



**Pedro Alexandre
Manso Teixeira**

**APLICAÇÃO DO FMECA A SISTEMAS DE
ESTABILIZAÇÃO E REFORÇO DE MACIÇOS EM
TÚNEIS**



**Pedro Alexandre
Manso Teixeira**

APLICAÇÃO DO FMECA A SISTEMAS DE ESTABILIZAÇÃO E REFORÇO DE MACIÇOS EM TÚNEIS

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor José Claudino de Pinho Cardoso, Professor Associado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e co-orientação da Professora Doutora Maria Fernanda da Silva Rodrigues, Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

Dedico este trabalho à minha mãe, Maria Veneranda Manso pelo incansável apoio que me tem dado ao longo de toda a minha vida mas principalmente ao longo de todo meu percurso académico.

o júri

presidente

Professor Doutor Paulo Barreto Cachim

Professor Associado, Universidade de Aveiro

Professor Doutor João Manuel Abreu dos Santos Baptista

Professor Auxiliar, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Professor Doutor José Claudino de Pinho Cardoso (orientador)

Professor Associado, Universidade de Aveiro

Professora Doutora Maria Fernanda da Silva Rodrigues (co-orientador)

Professora Auxiliar, Universidade de Aveiro

agradecimentos

Sendo este trabalho umas das etapas finais do meu percurso académico não quero deixar de agradecer a todos aqueles que directa ou indirectamente deram o seu contributo para a concretização do mesmo.

Aos Professores, Doutor Claudino Cardoso e Doutora Fernanda Rodrigues por toda a ajuda prestada, pelos seus comentários, críticas e pelo seu ensinamento e orientação que me disponibilizaram durante o decorrer deste trabalho.

Ao Sr. Inspector Geral da ACT de Lisboa e ao Sr. Inspector Manuel Coelho pela disponibilidade prestada em nos atender bem como pela informação útil que foi disponibilizada.

Ao Sr. Engenheiro Arnaldo Videira da EDP por ter facultado o estágio nas obras de Bemposta II e Picote II, bem como pela disponibilidade prestada e motivação.

Aos responsáveis pela coordenação de segurança da empresa Tecnoplano, presente na obra de Picote II, principalmente ao Sr. Engenheiro Edgar Botelho e ao Sr. Engenheiro Nuno Rodrigues, pelo interesse, disponibilidade prestada e pelo material disponibilizado.

A toda equipa de segurança da obra de reforço de potência da barragem de aproveitamento hidroeléctrico de Bemposta II, principalmente ao Sr. Engenheiro João Aragão, pelo interesse, disponibilidade prestada bem como pelas informações úteis disponibilizadas.

E finalmente a toda a minha família mas principalmente a minha mãe pelo apoio incondicional, incentivo e confiança que sempre depositaram em mim.

A todos muito obrigado.

palavras-chave

Túnel, estabilização, segurança, perigo, risco, falha, método de **Análise dos Modos de Falha, Efeitos e Criticidade** - FMECA, betão projectado reforçado com fibras metálicas, pregagem, cambota metálica.

resumo

O presente trabalho tem como principal objectivo o estudo dos métodos mais representativos de reforço e estabilização de maciços, na construção e/ou reabilitação de túneis, avaliando os riscos associados e procedendo à hierarquização dos vários métodos.

Para melhor interpretação de todos os conceitos relacionados com a temática, apresenta-se um desenvolvimento teórico, descrevendo os vários métodos construtivos (perfuração e estabilização) de túneis.

De acordo com o objectivo do estudo, são analisadas as falhas potenciais dos métodos mais representativos de reforço e estabilização de maciços em túneis, procedendo à correspondente avaliação de riscos. Os métodos de estabilização estudados são o betão projectado reforçado com fibras metálicas, as cambotas metálicas, as pregagens tipo *Swellex* e as pregagens activas com injeção de calda.

Na base de todo este estudo, está a aplicação do método de **Análise dos Modos de Falha, Efeitos e Criticidade** – FMECA (*Failure Mode and Effect and Criticality Analysis*).

No final procede-se à análise dos resultados obtidos e hierarquização dos vários métodos de estabilização estudados. Concluiu-se que os métodos apresentam níveis de risco muito semelhantes entre si, no entanto foi possível concluir-se que o método de estabilização com recurso a pregagens tipo *Swellex* é o que apresenta níveis de risco mais elevados, por consequência mais perigoso e o método de estabilização com recurso a betão projectado reforçado com fibras metálicas é o que apresenta níveis de risco menos elevados, considerando-se menos perigoso.

Keywords

Tunnel, stabilization, security, danger, risk, failure , method of **Failure Mode and Effect and Criticality Analysis – FMECA**, projected concrete reinforced with metallic fibers, rockbolts, metallic crankshafts.

Abstract

The main objective of the present work is the study of the most representative methods of soil reinforcement and stabilization, in the construction and/or rehabilitation of tunnels, evaluating the associated risks and proceeding to the hierarchization of the several methods.

In order to better understand the related concepts with the subject, it is presented a theoretical development that describes the several constructive methods (drilling and stabilization) of tunnels.

According to the aim of the study, the potential faults of the most representative approaches of soil reinforcement and stabilization in tunnels are analyzed, proceeding to the consequent evaluation of risks. The stabilization methods studied are the projected concrete reinforced with metallic fibers, metallic crankshafts, Swellex bolts type and active bolts with weld injection.

In the basis of all this study is the application of the Method - **Failure Mode, Effects and Criticality Analysis**– FMECA.

In the end, it is carried out an analysis of the obtained results and it is done the hierarchization of the several methods of stabilization studied. It was concluded that the methods present levels of risk that are very similar among themselves, however, it was also possible to conclude that the stabilization method with resource to *Swellex* bolts type is the one that presents higher levels of risk and it is, consequently, more dangerous, and the stabilization method with resource to projected concrete reinforced with metallic fibers is the one that presents less high levels of risk, being for that reason considered less dangerous.

ÍNDICE

ÍNDICE.....	I
ÍNDICE DE FIGURAS	III
ÍNDICE DE TABELAS.....	V
ÍNDICE DE SIGLAS.....	VII
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. OBJECTO DE ESTUDO.....	3
1.3. JUSTIFICAÇÃO DO TEMA.....	3
1.4. OBJECTIVOS	4
1.5. METODOLOGIA	5
1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO	6
2. PESQUISA BIBLIOGRÁFICA/ESTADO DA ARTE	7
2.1. INTRODUÇÃO	7
2.1.1. Tipos de túneis	7
2.1.2. Princípios básicos dos túneis.....	7
2.2. PLANEAMENTO E EXECUÇÃO.....	8
2.2.1. Planeamento para execução de um túnel.....	8
2.2.2. Métodos de escavação	11
2.2.2.1. Métodos de execução de túneis em galeria	11
2.2.2.1.1. Recurso a explosivos.....	11
2.2.2.1.2. Método TBM.....	12
2.2.2.1.3. Método NATM.....	15
2.2.2.2. Métodos de Execução de Galerias a Céu Aberto.....	18
2.2.2.2.1. Trincheiras ou VCA.....	18
2.3. ESTABILIZAÇÃO DA CONSTRUÇÃO	19
2.3.1. Tipo de Estabilizações de túneis.....	19
2.3.1.1. Jet-grouting.....	19
2.3.1.2. Betão projectado reforçado com fibras metálicas.....	23
2.3.1.3. Reforço com anéis pré-fabricados	24
2.3.1.4. Reforço usando painéis metálicos	25
2.3.1.5. Estabilizações com recurso a ancoragens ou pregagens	26
2.3.1.6. Uso de rede metálica	33
2.3.1.7. Uso de cambotas metálicas	33
2.3.1.8. Uso de enfilagens	34
2.4. PREVENÇÃO DE RISCOS PROFISSIONAIS.....	34
2.4.1. Aspectos normativos de segurança	34
2.4.2. Segurança dos trabalhadores	37
2.4.3. Acidentes ocorridos em túneis.....	37
3. MATERIAIS E MÉTODOS (FMEA - FMECA)	41
3.1. INTRODUÇÃO	41
3.2. TIPOS DE FMEA	43
3.3. FASES DE DESENVOLVIMENTO DO FMEA E FMECA	45
3.4. DEFINIÇÃO DE ESCALAS DE FMECA PARA APLICAÇÃO AO CASO DE ESTUDO	48
4. APLICAÇÃO DO FMECA	55
4.1. REFORÇO E ESTABILIZAÇÃO DE TÚNEIS COM RECURSO A BETÃO PROJECTADO REFORÇADO COM FIBRAS METÁLICAS	55
4.1.1. Processo construtivo	55
4.1.2. Equipamentos de protecção colectiva necessários	56
4.1.3. Equipamentos de protecção individual necessários	57
4.1.4. Aplicação do FMECA	58
4.1.5. Análise de dados.....	61

4.2.	REFORÇO E ESTABILIZAÇÃO DE TÚNEIS COM RECURSO A CMBOTAS METÁLICAS	64
4.2.1.	Processo construtivo	64
4.2.2.	Equipamentos de protecção colectiva necessários	66
4.2.3.	Equipamentos de protecção individual necessários	67
4.2.4.	Aplicação do FMECA	68
4.2.5.	Análise de dados	71
4.3.	REFORÇO E ESTABILIZAÇÃO DE TÚNEIS COM RECURSO A PREGAGENS TIPO SWELLEX	74
4.3.1.	Processo construtivo	74
4.3.2.	Equipamentos de protecção colectiva necessários	75
4.3.3.	Equipamentos de protecção individual necessários	76
4.3.1.	Aplicação do FMECA	77
4.3.2.	Análise de dados	81
4.4.	REFORÇO E ESTABILIZAÇÃO DE TÚNEIS COM RECURSO A PREGAGENS COM INJEÇÃO DE CALDA	84
4.4.1.	Processo construtivo	84
4.4.2.	Equipamentos de protecção colectiva necessários	87
4.4.3.	Equipamentos de protecção individual necessários	87
4.4.4.	Aplicação do FMECA	89
4.4.5.	Análise de dados	93
4.5.	ANÁLISE COMPARATIVA DOS MÉTODOS EM ANÁLISE	96
4.6.	REGRAS GERAIS DE SEGURANÇA EM TÚNEIS	98
4.7.	SINALIZAÇÃO DE SEGURANÇA	100
4.8.	ACÇÕES DE FORMAÇÃO, INFORMAÇÃO E SENSIBILIZAÇÃO ESPECÍFICAS	102
5.	TESTE DA METODOLOGIA	105
5.1.	INTRODUÇÃO	105
5.2.	METODOLOGIA	105
5.3.	RESULTADOS E CONCLUSÕES DO TESTE	106
6.	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS	109
6.1.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	109
6.2.	DIFICULDADES SENTIDAS	109
6.3.	SÍNTESE DE RESULTADOS	110
6.4.	CONCLUSÕES FINAIS	112
6.5.	INVESTIGAÇÕES FUTURAS	113
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	115
ANEXO I - Teste de Metodologia		Erro! Marcador não definido.

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

Figura 2.1 - Sistema de ventilação durante a execução do túnel da obra de reforço de potência da barragem de exploração hidroelétrica Bemposta II (Bemposta II, 2009).	10
Figura 2.2 - Sistemas de ventilação artificial que se podem utilizar em obras subterrâneas (Guerreiro, 2000).....	11
Figura 2.3 - Tuneladora em actividade (Cigla, Yagiz <i>et al.</i> , 2001).	13
Figura 2.4 - Tipos de <i>shield</i> e seu funcionamento (adaptado de Metro.SP.Gov (2008)).	14
Figura 2.5 - Cambotas metálica (Vieira, 2003).....	17
Figura 2.6 - Colocação da rede metálica (Vieira, 2003).	17
Figura 2.7 - Betão projectado (Vieira, 2003).	17
Figura 2.8 - Enfilagem no tecto do túnel (Vieira, 2003).	17
Figura 2.9 - Pormenores de ancoragens (Construlink, 2003).	17
Figura 2.10 - Pormenores de pregagens na obra de reforço de potência da barragem de exploração hidroelétrico de Picote II (Picote II (A), 2009).	17
Figura 2.11 - Pormenores de pregagens tipo <i>Swellex</i> na obra de reforço de potência da barragem de exploração hidroelétrico de Picote II (Picote II (A), 2009).	17
Figura 2.12 - Método <i>cut-and-cover</i> , grandes valas a céu aberto na avenida Jabaquara São Paulo (Castro, 2004).	19
Figura 2.13 - Diagrama esquemático da técnica de melhoria de solos – <i>jet-grouting</i> (Carreto, 2000)....	20
Figura 2.14 - Representação esquemática dos sistemas de <i>jet-grouting</i> (Carreto, 2000)	22
Figura 2.15 - Aduela pré-fabricada da MACCAFERRI (Maccaferri, 2008).	24
Figura 2.16- Reforço com chapas de aço (Adaptado de Kiriyaama <i>et al.</i> , 2005).	25
Figura 2.17 - Tipos de pregagens (adaptado de Hoek e tal., 1998).	28
Figura 2.18 - Modo de funcionamento da pregagem <i>Swellex</i> e da interacção entre a rocha e o tubo: (a) Colocação da <i>Swellex</i> no orifício, (b) O tubo é expandido sob alta pressão de água, (c) A pressão da água é libertada. (adaptado de Li e Håkansson, 1999).	29
Figura 2.19 - Componentes principais de um Jumbo de furação de bancada (Adaptado de Tamrock, 1984 <i>cit in</i> IGM (1999)).....	31
Figura 2.20 - Jumbo de furação para colocação de <i>Swellex</i> na obra de Picote II (Picote II (A), 2009)..	31
Figura 2.21 - Tipos de ancoragens disponíveis no mercado (Hoek et al., 1998).	32
Figura 2.22 – Torgue (REFER, 2008).....	32
Figura 2.23 – Aplicação de redes metálicas (Guerreiro, 2000).	33
Figura 2.24 - Principais categorias de causas de acidentes de trabalho em túneis (Adaptado de Seidenfuss, 2006 cit. in Revista <i>Téchne</i> , 2008).	38
Figura 2.25 - Tipos de colapsos ocorridos em túneis (Adaptado de Seidenfuss, 2006 cit. in Revista <i>Téchne</i> , 2008).	38
Figura 2.26 - Incidência de acidentes de trabalho em túneis por método construtivo (Adaptado de Seidenfuss, 2006 cit. in Revista <i>Téchne</i> , 2008).	39

CAPÍTULO 4

Figura 4.1 – Equipamento de projecção ‘robot’ (Picote II (A), 2009).....	56
Figura 4.2 - Percentagens de valores referentes a cada zona de risco para o método de estabilização de maciços em túneis com recurso a betão projectado.	61
Figura 4.3 - Percentagens de cada um dos valores referentes a cada zona de risco para o método de estabilização de maciços em túneis com recurso a betão projectado.	63
Figura 4.4 - Apoio dos pés direitos para aumentar a superfície de contacto (Picote II (B), 2009)	65
Figura 4.5 - Elementos constituintes de uma cambota e sua fixação (Picote II (B), 2009)	66
Figura 4.6 - Percentagens de valores referentes a cada zona de risco para o método de estabilização de maciços em túneis com recurso a cambotas metálicas.	71
Figura 4.7 - Percentagens de cada um dos valores referentes a cada zona de risco para o método de estabilização de maciços em túneis com recurso a cambotas metálicas.	73
Figura 4.8 - Coluna de perfuração ‘Jumbo’ (Picote II (A), 2009)	75
Figura 4.9 - Percentagens de valores referentes a cada zona de risco para o método de estabilização de maciços em túneis com recurso a pregagens tipo <i>Swellex</i>.	81
Figura 4.10 - Percentagens de cada um dos valores referentes a cada zona de risco para o método de estabilização de maciços em túneis com recurso a pregagens tipo <i>Swellex</i>.	83
Figura 4.11 – Injecção de calda em pregagens (Picote II (A), 2009)	86
Figura 4.12 - Pregagem com pré-esforço aplicado (Picote II (A), 2009)	86
Figura 4.13 - Percentagens de valores referentes a cada zona de risco para o método de estabilização de maciços em túneis com recurso a pregagens activas com injecção de calda.	93
Figura 4.14 - Percentagens de cada um dos valores referentes a cada zona de risco para o método de estabilização de maciços em túneis com recurso a pregagens activas com injecção de calda.	95
Figura 4.15 - Percentagens de valores referentes a cada zona de risco, atribuídos a métodos de estabilização e reforço de maciços em túneis.	96
Figura 4.16 - Percentagens de valores referentes à zona de risco médio-baixo e ao somatório dos valores referentes às zonas de risco elevado e muito elevado, para métodos de estabilização e reforço de maciços em túneis.	97
Figura 4.17 - Sinalização de obrigação.....	100
Figura 4.18 - Sinalização de perigo	101
Figura 4.19 - Sinalização de proibição	101
Figura 4.20 - Sinalização de obstáculo	101
Figura 4.21 - Sinalização de emergência	101
Figura 4.22 - Sinalização gestual	102

CAPÍTULO 5

Figura 5.1 - Percentagens de valores iguais ou diferentes, relativamente aos obtidos	107
Figura 5.2 - Valores que diferem apenas de uma unidade no dígito relativo à gravidade ou relativo à probabilidade (no conjunto de valores que diferem em apenas 1 dígito de uma unidade).	107

ÍNDICE DE TABELAS

CAPÍTULO 2

Tabela 2.1 - Colapsos em túneis (ITIG, 2006 e 2007, adaptado da Revista Técnica, 2008).....	39
---	----

CAPÍTULO 3

Tabela 3.1 - Escala de índice de risco (Adaptado de Lluna (1997: 216) e de Roxo, (2003:200)).....	48
Tabela 3.2 - Escala de gravidade (Adaptado de Lluna, (1997) e de Roxo, (2003:195 a 200))	49
Tabela 3.3 - Escala de probabilidade de ocorrência (Adaptado de Lluna (1997); Roxo, (2003:195 a 200) e Rodrigues, (2008)).....	50
Tabela 3.4 - Escala de índice de risco modificada 1 (Adaptado de Lluna (1997: 216) e de Roxo, (2003:200)).....	51
Tabela 3.5 - Escala de índice de risco modificada 2 (Adaptado de Lluna (1997: 216) e de Roxo, (2003:200)).....	52
Tabela 3.6 – Configuração da estrutura das tabelas aplicadas no FMECA	53

CAPÍTULO 4

Tabela 4.1 – Aplicação do FMECA ao método de estabilização de maciços em túneis com recurso a betão projectado,	58
reforçado com fibras metálicas.	58
Tabela 4.2 - Análise de dados de valores máximo e mínimos de índice de risco referente a cada zona de risco, relativamente ao método de estabilização de maciços em túneis com recurso a betão projectado (reforçado com fibras metálicas).	61
Tabela 4.3 – Aplicação do FMECA ao método de estabilização de maciços em túneis com recurso a cambotas metálicas.	68
Tabela 4.4 - Análise de dados de valores máximo e mínimos de índice de risco referente a cada zona de risco, relativamente ao método de estabilização de maciços em túneis com recurso a cambotas metálicas.	71
Tabela 4.5 – Aplicação do FMECA ao método de estabilização de maciços em túneis com recurso a pregagens tipo <i>Swellex</i>	77
Tabela 4.6 - Análise de dados de valores máximo e mínimos de índice de risco referente a cada zona de risco, relativamente ao método de estabilização de maciços em túneis com recurso a pregagens tipo <i>Swellex</i>	81
Tabela 4.7 – Aplicação do FMECA ao método de estabilização de maciços em túneis com recurso a pregagens.	89
activas com injeção de calda.	89
Tabela 4.8 - Análise de dados de valores máximo e mínimos de índice de risco referente a cada zona de risco, relativamente ao método de estabilização de maciços em túneis com recurso a pregagens activas com injeção de calda.	93

CAPÍTULO 5

Tabela 5.1 - Percentagens de valores diferentes que se situam na mesma zona de risco e de valores diferentes mas com um dígito igual e outro que difere de uma unidade, relativamente aos 86,4% de valores diferentes dos obtidos..... 108

ANEXO I

Tabela I-1 - Escala de índice de risco (Adaptado de Lluna (1997: 216) e de Roxo, (2003:200))..... Erro! Marcador não definido.

Tabela I-2 - Escala de gravidade (Adaptado de Lluna, (1997) e de Roxo, (2003:195 a 200)) Erro! Marcador não definido.

Tabela I-3 - Escala de probabilidade de ocorrência (Adaptado de Lluna (1997); Roxo, (2003:195 a 200) e Rodrigues F., (2008))..... Erro! Marcador não definido.

Tabela I-4 - Escala de índice de risco modificada 1 (Adaptado de Lluna (1997: 216) e de Roxo, (2003:200))..... Erro! Marcador não definido.

Tabela I-5 - Escala de índice de risco modificada 2 (Adaptado de Lluna (1997: 216) e de Roxo, (2003:200))..... Erro! Marcador não definido.

Tabela I-6 – Aplicação do FMECA ao método de estabilização de maciços em túneis com recurso a betão projectado, Erro! Marcador não definido.
reforçado com fibras metálicas. Erro! Marcador não definido.

Tabela I-7 – Aplicação do FMECA ao método de estabilização de maciços em túneis com recurso a cambotas metálicas..... Erro! Marcador não definido.

Tabela I-8 – Aplicação do FMECA ao método de estabilização de maciços em túneis com recurso a pregagens tipo *Swellex*..... Erro! Marcador não definido.

Tabela I-9 – Aplicação do FMECA ao método de estabilização de maciços em túneis com recurso a activas com injeção de calda. Erro! Marcador não definido.

ÍNDICE DE SIGLAS

ACT – Autoridade para as Condições do Trabalho

BS – “*British Standards*”

BSI – “*British Standards Institution*”

CEE – Comunidade Económica Europeia

CES – Chaminé de Equilíbrio Superior

CNPGB – Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens

DFMEA – “*Design Failure Mode and Effects Analysis*”

EDP – Energias De Portugal

EEAT – Estatísticas Europeias de Acidentes de Trabalho

EPBS – “*Earth Pressure Balanced Shield*”

EPC – Equipamento de Protecção Colectiva

EPI – Equipamento de Protecção Individual

FMEA – Método de Análise de Falhas e Efeitos;
“*Failure Modes and Effects Analysis*”

FMECA – Análise dos Modos de Falha, Efeitos e Criticidade;
“*Failure Mode and Effect and Criticality Analysis*”

G – Índice de Gravidade

HSE – “*Health and Safety Executive*”

IGM – Instituto Geológico Mineiro

IGT – Inspeção Geral do Trabalho

ILO-OHS – “*International Labour Organisation – Occupational Health and Safety*”

IR – Índice de Risco

ISO – “*International Organization for Standardization*”

ITIG – “*International Tunneling Insurance Group*”

ITA – Associação Internacional de Túneis e do Espaço Subterrâneo

NASA – “*National Aeronautics and Space Administration*”

NATM – “*New Austrian Tunnelling Method*”

NP – Norma Portuguesa

O – Índice de Probabilidade de Ocorrência

OHSAS – Série de Avaliação de Saúde e Segurança Ocupacional
“*Occupational Health and Safety Assessment Series*”

PFMEA – “*Process Failure Mode and Effects Analysis*”

prNP – Projecto de Norma Portuguesa

REFER – Rede Ferroviária Nacional

RIDDOR – “*Reporting of Injuries, Diseases and Dangerous Occurrences Regulations*”

RPN – Número de Prioridade de Risco;
“*Risk Priority Number*”

SAEA – Sociedade Austríaca de Engenheiros e Arquitectos

SGS – Sistemas de Gestão de Segurança

SGSST – Sistemas de Gestão de Segurança e Saúde do Trabalho

SPT – “*Standard Penetration Test*”

SST – Segurança e Saúde no Trabalho

TBM – “*Tunnel Boring Machines*”

VCA – Valas a Céu Aberto

ÍNDICE DE UNIDADES

[mA] – miliAmper

[MPa] – Mega Pascal

1. INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

Ao longo dos tempos as obras de construção civil têm vindo a desenvolver-se de forma a dar vida a projectos de alta envergadura, associados a elevados níveis de risco, desafiando as leis da física.

A construção de um túnel é assim, um dos desafios mais complexos no campo da Engenharia. De uma forma generalista um túnel pode ser definido como uma passagem ou caminho subterrâneo, que atravessa o solo e que pode ser usado como solução para vencer obstáculos no traçado de estradas, ferrovias, redes de utilidade pública e telecomunicações.

Do ponto de vista histórico, a construção dos primeiros túneis ocorreram na civilização egípcia, relacionados com construções para sistemas hidráulicos, nomeadamente a construção de diques e canais, para permitirem a irrigação das terras mais altas. A civilização grega foi também protagonista no aparecimento dos primeiros túneis através da execução de um túnel na ilha de Samos datado de cerca de 550 A.C. (Agostinho e Trigo, 2006).

Apesar da construção dos primeiros túneis não ser um facto recente, estas obras de arte começaram a ser aplicadas a uma maior escala, com o aparecimento dos caminhos-de-ferro, como citado por Agostinho e Trigo, 2006: *‘foi o advento dos caminhos-de-ferro que veio trazer novas exigências no que respeita a túneis e pontes.’*

A transposição de barreiras naturais (montanhas, rios, vales ...) revestiu-se de elevada complexidade ao longo dos anos. A evolução tecnológica permite hoje, ultrapassar estas barreiras, executando obras de arte em melhores condições de trabalho e, consequentemente, com níveis mais elevados de segurança estrutural e do trabalho, minimizando a probabilidade de ocorrência de falhas e dos consequentes efeitos. No entanto, a implementação e o controlo de procedimentos de trabalho correctos, são fundamentais para se atingir o objectivo das “zero” falhas, “zero” acidentes.

Contudo, para levar a cabo uma obra deste nível de complexidade, o Homem sempre necessitou de socorrer-se de capacidade de organização, de conhecimentos de planeamento e gestão (Agostinho e Trigo, 2006). A fase de concepção de qualquer projecto é a fase privilegiada para se proceder à identificação dos perigos e à sua eliminação ou pelo menos

à sua minimização. Estas acções são concretizadas na fase de projecto, pelo recurso à escolha de métodos e tecnologias mais seguras, cujo objectivo é garantir elevados níveis de segurança, quer durante a fase de construção, quer durante a fase de utilização e exploração da obra.

Actualmente, a segurança é uma preocupação no campo da Engenharia, pois pretende-se diminuir a probabilidade de ocorrência de falhas, das quais resultam problemas de segurança estrutural e de segurança dos intervenientes, que podem originar acidentes de trabalho graves ou mortais. Desta forma, devem ser analisadas as falhas prováveis e os riscos associados a qualquer actividade realizada durante a execução dos trabalhos, podendo recorrer-se ao **Método de Análise de Falhas e Efeitos - FMEA**¹ e/ou **FMECA**² - **Análise dos Modos de Falha, Efeitos e Criticidade**. Este último método tem por objectivo complementar a análise efectuada pelo FMEA, procedendo-se a uma análise de criticidade e hierarquização, de acordo com o risco potencial através do **RPN**³ - **Número Prioritário de Risco** ou também denominado de **Índice de Risco - IR**.

Em Portugal foram construídos vários túneis que permanecem em funcionamento tais como, o **Túnel de Alhadas**, túnel ferroviário do Ramal da Figueira da Foz, entre os apeadeiros de Maiorca e Alhadas-Brenha, com uma extensão de 519 metros (Wikipédia (A), 2009). O **Túnel de Chão de Maçãs**, túnel ferroviário, situado na linha do Norte entre as estações de Caxarias e Chão de Maçãs (Gare), na localidade de Chão de Maçãs, Sabacheira, Tomar, inaugurado em 1864, com cerca de 650 metros (Wikipédia (B), 2009). O **túnel do Marquês**, em Lisboa, permite a ligação da Avenida Engenheiro Duarte Pacheco, nas Amoreiras, à Praça Marquês de Pombal, Avenida Fontes Pereira de Melo e Avenida António Augusto de Aguiar. Este túnel foi inaugurado no dia 25 de Abril de 2007, tem uma extensão total de 1725 m (Wikipédia (C), 2009). O **túnel do Rossio** permite o acesso dos comboios à estação do Rossio, no centro de Lisboa, a partir da estação de Campolide, perfazendo o segmento inicial da Linha de Sintra. Tem via dupla com 2613 m de comprimento e com um perfil abobadado de 8 m de largura por 6 m de altura até ao fecho da abóbada (Wikipédia (D), 2009).

Actualmente existe a necessidade de se construir este tipo de estrutura em obras rodoviárias, ferroviárias, de construção e reforço de potência em barragens, No entanto,

¹ *Failure Modes and Effects Analysis*

² *Failure Mode and Effect and Criticality Analysis*

³ *Risk Priority Number*

é em obras de reforço de potência de barragens de exploração hidroeléctrica, que se verifica um grande recurso a este tipo de estrutura.

Desta forma, existe a necessidade e oportunidade de se proceder à análise de falhas, dos métodos mais representativos de reforço de maciços na construção e/ou reabilitação de túneis.

1.2. OBJECTO DE ESTUDO

O objecto do estudo é a análise de falhas dos métodos mais representativos de reforço e estabilização de maciços, na construção e/ou reabilitação de túneis e a correspondente avaliação de riscos.

1.3. JUSTIFICAÇÃO DO TEMA

O interesse pelo tema em questão teve como base dois critérios importantes na Engenharia Civil: por um lado, a complexidade da escavação e estabilização de maciços em túneis e por outro, o garantir em simultâneo a segurança dos trabalhadores, diminuindo os riscos associados ao desempenho das tarefas.

Como referido, o interesse pelo tema em estudo advém também, do facto de que a construção de um túnel é um dos desafios mais complexos no campo da engenharia, sendo que, no reforço e estabilização dos respectivos maciços, estão associadas operações que aplicam diversas tecnologias com níveis de risco elevados. Associada à complexidade e diversidade das operações que este tipo de obra engloba, a garantia de níveis de segurança elevados é prioritária. Com este objectivo, têm vindo a ser desenvolvidos quer ao nível técnico, quer ao nível organizacional, muitos esforços de modo a minimizar os acidentes durante a execução dos trabalhos. Para isso, são efectuados estudos de avaliação de riscos de modo a eliminá-los/minimiza-los, procurando eliminar na origem as possíveis falhas que podem ocorrer ao longo de toda a construção e que podem resultar em acidentes graves ou mortais.

O controlo das tarefas desempenhadas dentro da obra é essencial para fornecer condições seguras de trabalho de forma a garantir a segurança dos trabalhadores durante a execução do túnel. É na fase de projecto que os meios técnicos têm de ser utilizados ou concebidos de modo a que, se promova e planeiem todos os mecanismos de forma a garantir a segurança da obra na fase de construção e de serviço.

Para o presente estudo foram escolhidos os métodos mais representativos de reforço e estabilização de maciços, na construção e/ou reabilitação de túneis:

- reforço e estabilização de maciços com recurso a **betão projectado (reforçado com fibras metálicas)**;
- reforço e estabilização de maciços com recurso a **cambotas metálicas**;
- reforço e estabilização de maciços com recurso a **pregagens tipo Swellex**;
- reforço e estabilização de maciços com recurso a **pregagens activas (com injeção de calda)**;

A escolha destes métodos deve-se ao facto de se ter acompanhado as obras de reforço de potência das barragens de exploração hidroelétrica de Bemposta II e Picote II, dando ao estudo um carácter aplicado.

1.4. OBJECTIVOS

O objectivo principal desta dissertação é estudar os sistemas de segurança no reforço e estabilização de maciços em túneis, avaliar os riscos e proceder à sua hierarquização.

Os sub-objectivos deste estudo consistiram na:

- obtenção do índice de risco dos métodos mais representativos de reforço e estabilização de maciços, na construção e/ou reabilitação de túneis, nomeadamente, betão projectado reforçado com fibras metálicas, cambotas metálicas, pregagens tipo *Swellex* e pregagens activas com injeção de calda;
- análise, comparação e hierarquização dos vários métodos do ponto de vista da segurança.

Para se atingir os objectivos e sub-objectivos, houve necessidade de se proceder às seguintes acções:

- estudo global das várias técnicas de construção e estabilização de túneis;
- análise de acidentes de trabalho ocorridos em obras de construção e reabilitação de túneis, analisando as causas dos mesmos e os principais modos de falha;
- estudo do método de análise de falhas e efeitos (FMEA e FMECA);

- estudo mais aprofundado e dissecação dos métodos de reforço e estabilização de maciços em túneis, nomeadamente, betão projectado reforçado com fibras metálicas, cambotas metálicas, pregagens tipo *Swellex* e pregagens activas com injeção de calda;
- aplicação do método de análise de falhas e efeitos (FMECA) às técnicas escolhidas.

1.5. METODOLOGIA

Iniciou-se este trabalho com uma pesquisa bibliográfica relativa à temática em estudo, de forma a aprofundar os conhecimentos relativamente ao modo de funcionamento dos túneis, bem como aos seus processos construtivos de escavação e estabilização.

Através da Autoridade para as Condições de Trabalho - ACT em Lisboa, teve-se acesso a relatórios de acidentes de trabalho ocorridos em obras de construção e reabilitação de túneis. Através da sua análise, tiraram-se conclusões sobre as suas causas e os principais modos de falha.

De forma a dar seguimento a uma correcta aplicação do método de análise de falhas e efeitos (FMEA e FMECA), procedeu-se a um estudo aprofundado sobre o seu modo de aplicação, funcionamento e interpretação dos dados obtidos.

Procedeu-se à escolha dos métodos mais representativos de reforço e estabilização de maciços, na construção e/ou reabilitação de túneis, nomeadamente, betão projectado reforçado com fibras metálicas, cambotas metálicas, pregagens tipo *Swellex* e pregagens activas com injeção de calda.

De modo a melhor entender estes métodos, foi feito uma pesquisa sobre cada um deles, identificando os seus modos de aplicação, características, vantagens e desvantagens, perigos associados, causas e efeitos. Para identificação das possíveis falhas, procedeu-se à dissecação de cada tarefa implícita em cada método. De forma a completar e enriquecer conhecimentos sobre a temática, foram acompanhadas as obras de reforço de potência das barragens de exploração hidroeléctrica de Bemposta II e Picote II.

Construíram-se ferramentas para se proceder à avaliação dos vários métodos escolhidos, elaborando uma matriz baseada no método de análise de falhas e efeitos, através da qual se identificaram os principais modos de falha de cada método em concreto.

Após análise dos resultados obtidos, procedeu-se à hierarquização dos vários métodos estudados, do ponto de vista da fiabilidade ao nível da segurança.

1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho encontra-se estruturado em sete capítulos.

O capítulo 1, identifica-se como “introdução” e encontra-se dividido em seis subcapítulos, nomeadamente o “enquadramento”, “objecto de estudo”, “objectivos”, “metodologia” e o presente ponto “estrutura do trabalho”.

O capítulo 2 “pesquisa bibliográfica/estado de arte”, está elaborado de forma a referir em termos actuais a temática em estudo, fazendo referência aos tipos de túneis, aos diversos sistemas de escavação e estabilização de túneis, prevenção de riscos e acidentes ocorridos.

O capítulo 3 “materiais e métodos”, faz referência ao método de análise de falhas e efeitos FMEA, onde se explica no que consiste e como é aplicado o método FMEA e o FMECA.

O capítulo 4 “aplicação do FMECA”, efectua a aplicação do FMECA aos vários métodos de estabilização dos túneis em estudo e a referente análise de resultados obtidos.

O capítulo 5 “teste da metodologia”, tem por base a fundamentação da dissertação, onde é explicado o procedimento escolhido para “validação” do método utilizado e dados obtidos.

O capítulo 6 “conclusões e perspectivas futuras”, apresenta as conclusões a que se chegou, dos resultados obtidos relativamente à aplicação do FMECA, bem como as dificuldades que se sentiram ao longo de todo este trabalho. Neste capítulo são ainda apresentadas algumas propostas para investigações futuras.

Por fim o capítulo 7 “referências bibliográficas”, indica as referências bibliográficas consultadas ao longo de todo o processo de pesquisa e desenvolvimento do trabalho.

2. PESQUISA BIBLIOGRÁFICA/ESTADO DA ARTE

2.1. INTRODUÇÃO

2.1.1. Tipos de túneis

Os túneis são classificados em três categorias relativamente à sua utilização, nomeadamente os de **mineração**, **de instalação de infra-estruturas** e **de circulação** (Harris, 2006).

2.1.2. Princípios básicos dos túneis

Podemos admitir que existem dois grandes grupos de túneis relativamente ao seu processo de escavação sendo estes **túneis naturais**, formados através da erosão e outras forças da natureza e **túneis artificiais** construídos pelo homem, isto é, túneis executados por processos de escavação (Harris, 2006).

Relativamente à constituição de um túnel, a sua “abertura” é denominada **portal**, o “tecto” do túnel, ou a metade superior do tubo, designa-se por **coroa** e a metade inferior, por **base**. A forma geométrica básica de um túnel é o **arco contínuo**, dado que se considera que esta é a forma ideal para suportar as acções multi-direccionais que se exercem em toda a sua envolvente (Harris, 2006).

Os túneis estão sujeitos a acções exercidas pelo solo adjacente, provocando forças de **tracção**, que expandem ou empurram material; de **compressão**, que contraem ou comprimem material; de **corte**, que provocam o deslizamento de uma face de material relativamente a outra em direcções opostas; de **torção**, que implicam uma rotação da secção do material. Assim, os túneis devem ser dimensionados e construídos com sistemas, com capacidade para suportar as acções que se exercem nas suas faces. Além das acções referidas, tem que se considerar a acção do **peso próprio**, peso da estrutura em si, e da **sobrecarga**, acções dos veículos e pessoas que o atravessam (Harris, 2006).

2.2. PLANEAMENTO E EXECUÇÃO

2.2.1. Planeamento para execução de um túnel

As técnicas empregues para se construir um túnel dependem das características do material geológico que a construção vai atravessar. Fazer túneis através de rochas ou solos moles tais como argila, pedra calcária ou arenito requer técnicas diferentes das necessárias para atravessamento de rochas duras tais como o granito, assim como a escavação de túneis subaquáticos, o mais desafiador de todos os ambientes, exige tecnologia especial.

Outro factor importante centra-se em toda a envolvente da obra, a qual se deve ter em consideração durante o planeamento prévio, devendo ser cuidadosamente analisada.

De uma forma resumida, devem-se executar sub-operações inerentes à construção de forma a planeá-la e executá-la correctamente e que envolvem:

- 1- execução de estudos geológicos/geotécnicos;
- 2- monitorização e inspecção das construções existentes;
- 3- escolha da técnica construtiva a aplicar;
- 4- escavação;
- 5- ventilação;
- 6- transporte do produto de extracção para fora do local de escavação;
- 7- contenção de terras;
- 8- impermeabilização;
- 9- betonagem;
- 10- observação e monitorização da obra.

O planeamento prévio, antes da construção de um túnel é baseado numa análise geológica completa, para determinar o tipo de solo ou rocha que se encontrará ao longo da construção e, consequentemente, avaliar os riscos relativos às diferentes formações, que permitirá o consequente desenvolvimento de um plano geral de escavação (Bastos, 1998). Dessa análise entre os factores que se determinam, revela-se a identificação dos tipos de solo e rocha a escavar, a avaliação de áreas de baixa resistência, incluindo zonas de falhas e cisalhamento, a existência de águas subterrâneas, incluindo zonas de fluxo, de pressão e riscos especiais, tais como bolsas de calor e gases (Harris, 2006).

Normalmente, um único túnel passa por mais de um tipo de formação geológica de diferentes características que implicarão ou não diferentes riscos. Assim, um bom planeamento permite que as equipas de trabalho estejam preparadas para essas variações desde o início, diminuindo a probabilidade de atrasos inesperados no meio do projecto e reduzindo a probabilidade de ocorrência de acidentes, como por exemplo os que resultam na sequência de desabamentos.

Relativamente à sub-operação de ‘**monitorização e inspecção das construções existentes**’, antes de iniciar qualquer intervenção numa determinada estrutura ou na sua fundação, deve haver o cuidado de serem efectuados estudos às construções existentes na envolvente, dos quais devem resultar relatórios de inspecção. Evita-se assim, que após o início da intervenção, os proprietários não responsabilizem os promotores dessa obra de danos já existentes nos seus edifícios. A situação também pode ser analisada segundo o interesse dos proprietários, que na ausência de um documento que assegure o estado de conservação do seu edifício, dificilmente conseguem provar que os danos foram causados durante a execução das obras de intervenção na estrutura contígua, ou no caso em estudo, no túnel em construção sob as fundações dos edifícios (Costa, 2006). Existem alguns métodos de monitorização, como o controlo da vibração do edifício, de fissuras, de deslocamentos relativos, medição de afundamento da estrutura, na sequência das intervenções no túnel. Respeitante à metodologia de inspecção, esta deve seguir numa primeira fase, uma consulta de informação histórica sobre os métodos construtivos aplicados nas construções adjacentes, materiais utilizados e possíveis problemas ocorridos na execução dessas estruturas. Numa fase posterior, devem efectuar-se visitas ao edifício procedendo-se ao levantamento geométrico, registo fotográfico e descrição de todas as patologias observadas (Costa, 2006).

A sub-operação de **ventilação** de todas as áreas fechadas de construção constitui uma acção indispensável para a realização de qualquer actividade. Durante a execução do túnel, existem perigos associados à má qualidade do ar que se gera no seu interior. Esta atmosfera perigosa deve-se a vários factores, entre os quais a profundidade e extensão do túnel, bem como a sua pequena entrada de ar que contribui para a diminuição de oxigénio. Por outro lado, o tráfego intenso que se verifica no interior do túnel relativo aos equipamentos de remoção do material proveniente da escavação, bem como aos próprios equipamentos de escavação utilizados, contribui para uma atmosfera perigosa que deve ser renovada para

que todos os intervenientes possam trabalhar em segurança, diminuindo os perigos de intoxicação. Assim, a ventilação de um túnel deve ser efectuada durante a fase de execução e durante a sua utilização. Esta ventilação deve ser feita através da utilização de extractores, como ilustrado na Figura 2.1, que quando posicionados convenientemente permitem que a renovação do ar seja efectuada.

Estes sistemas devem ser estudados com vista a proporcionar aos trabalhadores atmosferas adequadas às condições de trabalho permitindo uma boa renovação do ar (Guerreiro, 2000).



Figura 2.1 - Sistema de ventilação durante a execução do túnel da obra de reforço de potência da barragem de exploração hidroelétrica Bemposta II (Bemposta II, 2009).

Os sistemas de ventilação a adoptar numa obra subterrânea podem ser de dois tipos (Guerreiro, 2000):

Ventilação natural – quando a circulação do ar se faz naturalmente sem instalação de ventilador, sendo a mesma suficiente para satisfazer as necessidades de forma a proporcionar aos trabalhadores uma atmosfera saudável;

Ventilação artificial – quando se torna necessária a instalação de ventiladores para promover a circulação do ar, de modo a satisfazer as necessidades dos trabalhadores, proporcionando uma atmosfera saudável. Dentro desta classe podem ser definidos dois tipos de ventilação:

- **Ventilação insuflante** – o sistema de ventilação injecta ar fresco directamente na frente, permitindo evitar a contaminação do ar que chega à frente de trabalho (Figura 2.2 – a));

- **Ventilação aspirante** – neste tipo de ventilação é criada uma depressão na frente que faz com que o ar existente nas cavidades de desmonte afluja à frente. No entanto este sistema possui a desvantagem de poder fazer chegar à zona de desmonte ar já contaminado (Figura 2.2 – b)).

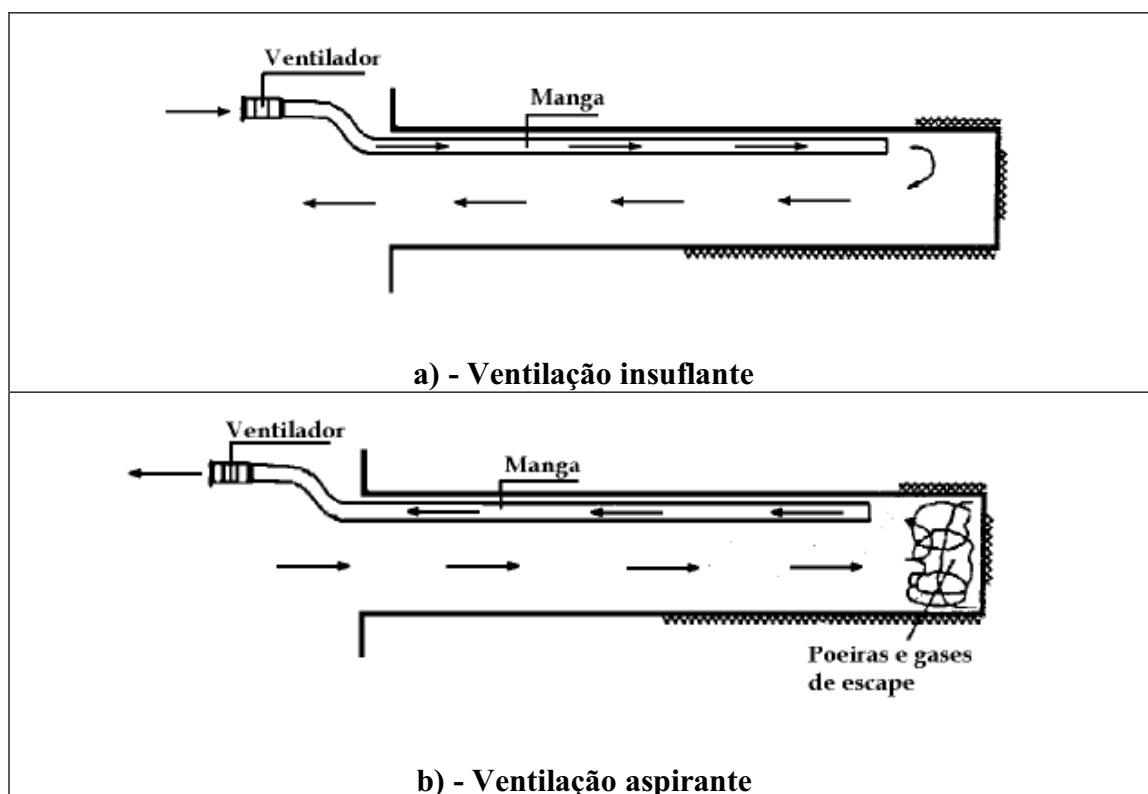


Figura 2.2 - Sistemas de ventilação artificial que se podem utilizar em obras subterrâneas (Guerreiro, 2000).

2.2.2. Métodos de escavação

2.2.2.1. Métodos de execução de túneis em galeria

2.2.2.1.1. Recurso a explosivos

O método de abertura de túneis com recurso a escavações a fogo é o mais comum em **solo rochoso**, podendo chegar a ser **o mais económico** (Pinheiro, 2004). O método consiste em abrir um certo número de furos na frente de trabalho, carregando-os com explosivos e detonando-os de seguida. A colocação do fogo é estruturada segundo

diagramas de fogo que, para se tornarem eficientes, dependem do número e orientação dos furos, tipos e quantidade de explosivos, número e sequência de retardos, etc. (Bastos, 1998).

Esta metodologia de abertura de túneis tem **duas desvantagens** principais: a primeira prende-se com o facto da carga explosiva ser dimensionada sem que a pressão de detonação que se exerce nas paredes dos furos seja superior à resistência de compressão da rocha; a segunda desvantagem está relacionada com a subescavação ou sobrescavação associada a este tipo de desmonte (Torres e Gama, 2004).

Para uma colocação rápida e segura dos explosivos pelos trabalhadores, é necessária a utilização de andaimes ou de equipamentos mecânicos (plataformas) para elevação de pessoas. A profundidade dos furos para a colocação das cargas explosivas, pode variar dependendo do tipo de rocha, tendo em geral cerca de 3 m de profundidade e apenas alguns centímetros de diâmetro. Depois de colocados os explosivos nos orifícios, evacua-se o túnel e detonam-se as cargas. Por fim, após todos os gases nocivos criados na explosão terem sido aspirados, os operários podem entrar e começar a retirar os destroços (Harris, 2006).

Após a denotação dos explosivos, desenvolvem-se actividades complementares, tais como a continuação da abertura mecânica do túnel até às dimensões de projecto, o saneamento mecânico e/ou manual de todos os blocos instáveis que apresentam risco de queda, a retirada do entulho para fora do local de trabalho, e a estabilização da cavidade.

2.2.2.1.2. Método TBM⁴

É uma técnica de execução de obras subterrâneas onde toda a estabilização do túnel ocorre em sintonia com o avanço da escavação, através do uso de cilindros hidráulicos, que aplicam esforços nos tubos que compõem a estrutura do túnel.

Este método, designado por *Pipe Jacking* (tubo cravado), aplica-se em túneis até um diâmetro máximo de 2500 mm, em sistemas de drenagem, transportes subterrâneos entre instalações industriais, condutas de cabos eléctricos, de gás, de telecomunicações e tubagens de uso múltiplo.

A escavação de túneis em terrenos brandos, ou pouco consistentes, foi efectuada, pela primeira vez, com níveis de segurança mais elevados, em 1825, por Marc I. Brunel,

⁴ *Tunnel Boring Machines*

responsável pela construção do primeiro túnel sob o Rio Tâmisa, na qual utilizou o avanço de um *shield* metálico, conhecido como escudo metálico e em que a escavação e o revestimento podiam ser feitos em segurança. Esse primeiro *shield* evoluiu com o tempo e hoje existem diversos tipos de máquinas tuneladoras, ***Tunnel Boring Machines – TBM***, que efectuem a escavação e entivação das paredes do túnel em simultâneo (Metro.SP.Gov, 2008).

Um *shield* (escudo metálico), é um cilindro de ferro ou aço que penetra no solo, esculpindo uma escavação de secção redonda e servindo de apoio ao solo, enquanto são removidos os detritos e se instala o revestimento permanente das paredes em aço ou betão pré-fabricado (Metro.SP.Gov, 2008). Quando é completada uma secção, o *shield* é inserido novamente e todo o processo é repetido.

O *Pipe Jacking* (tubo cravado) é aplicado em solos constituídos por argila, lodo ou lama. Nestes tipos de solos, o intervalo de tempo durante o qual este se auto-sustenta, em segurança, durante a escavação é fundamental. Como o tempo de auto-sustentação é menor nas escavações em solo mole, os desabamentos são uma ameaça constante. Para impedir que isso aconteça, recorre-se ao uso de *shield* ou de **TBM's**.

Os equipamentos mais recentes são as tuneladoras (TBM), ilustradas na Figura 2.3, que funcionam como fábricas móveis que escavam o túnel, retiram as terras e escoram as paredes com betão. Este método construtivo foi usado na execução da linha do metropolitano de Lisboa (Metro Lisboa, 2006).



Figura 2.3 - Tuneladora em actividade (Cigla, Yagiz *et al.*, 2001).

Relativamente ao tipo de suporte os *shield's* podem ser classificados em *shield* manual (frente aberta), *shield* com suporte mecânico frontal, *shield* manual com ar comprimido, *shield* bentonítico (*slurry shield*) e *Earth Pressure Balanced Shield – EPBS* (Metro.SP.Gov 2008).

A Figura 2.4 representa esquematicamente o funcionamento dos principais tipos de *shield*.

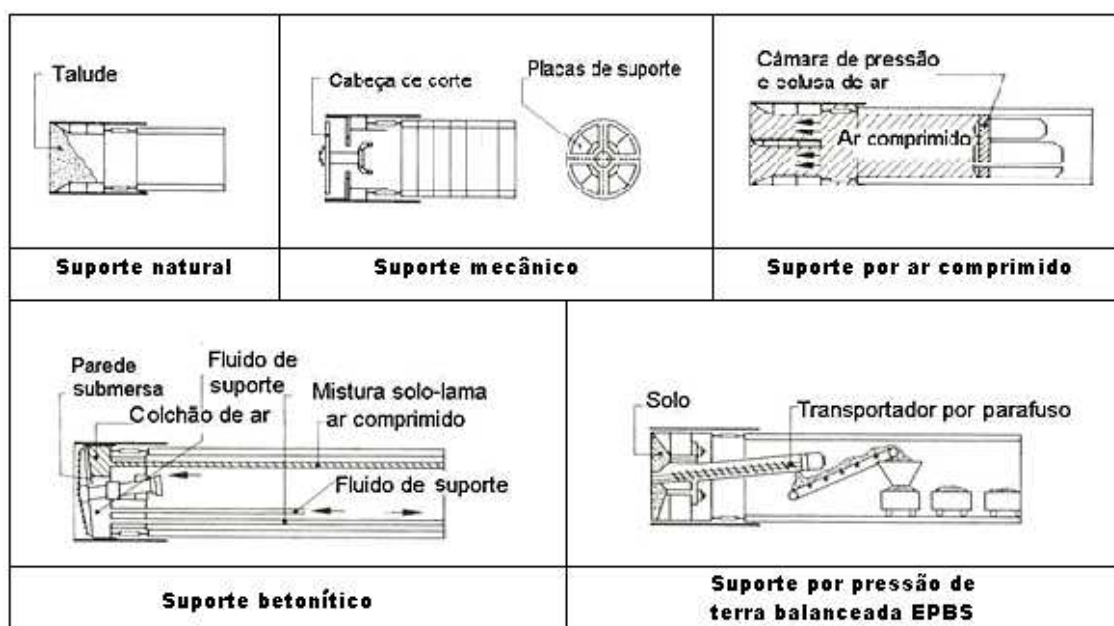


Figura 2.4 - Tipos de *shield* e seu funcionamento (adaptado de Metro.SP.Gov (2008)).

O recurso a este método, quando planeado convenientemente e existindo um conhecimento minucioso do solo, pode levar à redução dos custos da obra e a maior rapidez de execução. No entanto, o investimento inicial é bastante maior, uma vez que se trata de um equipamento bastante complexo, que requer alguns cuidados no seu manuseamento, que só deve ser efectuado por pessoas com conhecimentos e formação adequados.

Existem algumas **vantagens** na utilização desta tecnologia tais como (Cigla, Yagiz *et al.*, 2001):

- qualidade elevada da superfície do túnel obtida;
- nível elevado de segurança dos trabalhadores;
- menores perturbações introduzidas na formação geológica;
- redução dos requisitos de ventilação pelo facto da superfície do túnel ficar lisa;
- implementação de sistemas contínuos para o transporte do material proveniente da escavação, dada a uniformidade das suas dimensões;
- fluxo contínuo da produção, precisão direccional a laser e possibilidade da sua autonomização ou controlo à distância;
- minimização dos transtornos introduzidos no tráfego e no meio ambiente;

- diminuição do prazo de execução relativamente às técnicas tradicionais;
- introdução do revestimento em simultâneo com o avanço da escavação;
- execução do trabalho sem necessidade de rebaixamento do nível freático.

Como em qualquer metodologia, existem também algumas **desvantagens** que podem ser associadas a este mecanismo (Cigla, Yagiz *et al.*, 2001):

- limitação da potência das máquinas;
- falta de capacidade para lidar com o inesperado;
- dificuldades de manobra nas constantes mudanças de direcção;
- introdução de vibrações no solo.

2.2.2.1.3. Método NATM⁵

Trata-se de um método construtivo, desenvolvido entre 1957 e 1965, que aparece pela primeira vez referenciado no ano de 1964, ao qual foi dado o nome de Novo Método Austríaco, para o distinguir de outro método construtivo mais antigo, também de origem Austríaca. Este método considera que a massa de rocha envolvente do túnel escavado contribui para a sua própria sustentação. A eventual deformação do solo é minimizada através da aplicação, imediatamente após o avanço da escavação, de uma primeira camada fina de betão projectado. A este método está associada uma complexa e sofisticada tarefa de instrumentação que monitoriza o estado do túnel escavado (Metro Lisboa, 2006).

Este método consiste em permitir que o solo sofra um relaxamento, de forma controlada, desenvolvendo-se tensões tangenciais que actuam em conjunto com o suporte. Mobilizando a resistência do solo, são feitas reduções substanciais nas necessidades da capacidade resistente de suporte, até atingir o equilíbrio. Assim sendo, a adopção destas técnicas construtivas levam a que o custo global das obras subterrâneas possa ser substancialmente reduzido (Gomes, 1998).

A definição deste método, apresentada pela Sociedade Austríaca de Engenheiros e Arquitectos (SAEA), explica claramente em que é que consiste (SAEA *cit. in* Gomes, 1998):

“O Novo Método Austríaco de construção de túneis constitui um método onde a rocha ou formações de solo circundantes do túnel são integradas num anel global, como

⁵ *New Austrian Tunnelling Method*

uma estrutura de suporte. Deste modo, o terreno envolvente será, ele próprio, parte integrante da estrutura de suporte.”

O NATM envolve, como referido, a escavação sequencial do maciço, mobilizando tensões suficientes para este se auto-suportar. Nas situações em que não seja possível garantir a total segurança do túnel e consequentemente dos trabalhadores, podem ser utilizados métodos de estabilização, como por exemplo **betão projectado**, com possível **adição de fibras metálicas**, associado a **cambotas metálicas**, **rede metálica (malha sol)**, **chumbadores**, **enfilagens**, **ancoragens** entre outros, tudo em função da capacidade de auto-suporte do maciço (Metro.SP.Gov, 2008). Este método é mais desenvolvido no ponto 2.3. Estabilização da construção.

Uma das **vantagens** deste método é a adaptabilidade da secção de escavação, que pode ser modificada em qualquer ponto, de acordo com as necessidades geométricas e de parcelar a escavação, sendo por vezes necessário em maciços pouco estáveis, ou que estão sob forte pressão hidrostática. Nesses casos, outras medidas que se associam à aplicação desse método são: rebaixamento do nível freático, revestimento prévio e, a mais frequente, injeções de caldas (Metro.SP.Gov, 2008).

Os tipos mais comuns de estabilização de maciços consistem em (Metro.SP.Gov, 2008):

- colunas de solo-betão horizontais ou verticais;
- enfilagens tubulares (injecção de calda de cimento através de tubos);
- enfilagens cravadas (tubos metálicos);
- injecção química (injecção de produtos químicos aglutinantes);
- agulhamento (varões de aço, fibra de vidro ou *jet-grouting*);
- drenagem - rebaixamento do nível freático (poços, ponteiras, drenos - vácuo);
- congelamento do maciço;
- enfilagens por micro túneis;
- projecção de betão.

O uso de betão projectado no método NATM tem por objectivo, tirar vantagens das deformações actuantes no maciço, e para tal, o suporte deve obedecer a algumas exigências tais como, ser capaz de selar a superfície exposta tão rápido quanto possível, ter resistência superficial inicial suficiente, de modo a evitar relaxamentos perigosos e ser

suficientemente indeformável para permitir a formação da zona de protecção para a equipa de trabalho avançar.

Os diferentes tipos de reforços e tratamentos utilizados estão ilustrados nas Figuras 2.5 a 2.11.



Figura 2.5 - Cambotas metálica (Vieira, 2003).



Figura 2.6 - Colocação da rede metálica (Vieira, 2003).



Figura 2.7 - Betão projectado (Vieira, 2003).



Figura 2.8 - Enfilagem no tecto do túnel (Vieira, 2003).



Figura 2.9 - Pormenores de ancoragens (Construlink, 2003).



Figura 2.10 - Pormenores de pregagens na obra de reforço de potência da barragem de exploração hidroeléctrico de Picote II (Picote II (A), 2009).



Figura 2.11 - Pormenores de pregagens tipo *Swellex* na obra de reforço de potência da barragem de exploração hidroeléctrico de Picote II (Picote II (A), 2009).

2.2.2.2. Métodos de Execução de Galerias a Céu Aberto

2.2.2.2.1. Trincheiras ou VCA⁶

Consideram-se métodos de execução a céu aberto todos aqueles em que se recorre à escavação de uma vala seguida da construção da parte inferior e das laterais. Após a execução da galeria e do fecho superior da estrutura executada na vala, procede-se à sua cobertura com o solo retirado na fase de escavação. Através deste método a galeria obtém-se sem recurso à perfuração do solo onde fica instalada.

Os métodos de execução a céu aberto têm diversas implicações ambientais e interferem com infra-estruturas existentes, pois provocam a elevada perturbação do meio em que se desenvolvem, exigem a remoção e/ou o desvio de infra-estruturas existentes no subsolo, tais como redes de águas, electricidade, gás, telecomunicações, implicando a posterior reposição das condições iniciais (Metro Lisboa, 2006).

Quando é executada uma vala na qual não exista posteriormente o fecho da galeria, a circulação ou colocação de infra-estruturas é feita a céu aberto. Esta situação designa-se circulação em trincheira, podendo ter as paredes da respectiva vala em talude natural, ou estabilizadas por outro processo que recorra a meios técnicos adequados, como por exemplo paredes verticais em betão, em pedra, ou outros.

Em linhas gerais, os procedimentos deste método passam pela abertura de valas de grandes dimensões, pela execução de paredes laterais de contenção, escoradas ou em talude, pelo rebaixamento do nível freático até à profundidade necessária, pela construção das estruturas definitivas, paredes, lajes e pilares, e finalmente pelo aterro (Metro Lisboa, 2006).

Este processo, ilustrado na Figura 2.12, é também designado por método *cut-and-cover*, no entanto existe uma variante deste processo, conhecido como método invertido ou *cover-and-cut*, utilizado quando a ocupação temporária da superfície necessita de ser abreviada devido às condições locais e para se obterem níveis elevados de segurança, relativamente ao risco de desabamento. Neste método invertido, as paredes de contenção são executadas a partir da superfície, em seguida, é executada a laje, que restabelece o tráfego à superfície, caso seja possível e necessário, e conclui-se com as etapas sucessivas de escavação (Metro.SP.Gov, 2008).

⁶ Valas a Céu Aberto

Este método foi utilizado entre outras, na obra do metropolitano no Terreiro do Paço em Lisboa.



Figura 2.12 - Método *cut-and-cover*, grandes valas a céu aberto na avenida Jabaquara São Paulo (Castro, 2004).

2.3. ESTABILIZAÇÃO DA CONSTRUÇÃO

2.3.1. Tipo de Estabilizações de túneis

2.3.1.1. Jet-grouting

Este método teve origem em 1970, decorrente da necessidade de execução de um tratamento prévio do terreno para possibilitar a implantação de edificações, constituindo um método de estabilização de solos. Consiste na alteração das propriedades mecânicas do solo *in situ*, conferindo ao maciço maior resistência, menor compressibilidade e relativa impermeabilidade.

Este método é utilizado em diversas situações, incluindo obras provisórias e definitivas, nomeadamente, escavações, reforço de fundações, cortinas impermeáveis e túneis. A utilização crescente desta técnica foi acompanhada de um importante desenvolvimento ao nível dos sistemas de injeção, que apresentava falhas de dimensionamento e de controlo da qualidade (Carreto, 2000).

Esta técnica de melhoria de solos realizada directamente no interior do terreno sem prévia escavação, por meio de injeção, utilizando para tal um ou mais jactos horizontais de grande velocidade (cerca de 250 m/s), que aplicam a sua elevada energia cinética na desagregação da estrutura do terreno natural, e na mistura de calda de cimento com as partículas de solo desagregado, dando origem a um material de melhores características

mecânicas e de menor permeabilidade, podendo ser considerado um método de elevado nível de eficácia e de segurança (Carreto, 2000).

Relativamente ao método *jet-grouting* já foram realizados por Carreto (2000), alguns estudos no âmbito da identificação dos principais parâmetros intervenientes no seu mecanismo físico e a respectiva influência sobre as características finais do material tratado, no que respeita às dimensões do corpo consolidado, resistência mecânica, deformabilidade e permeabilidade.

O método *jet-grouting* inicia-se pela colocação de uma sonda em posição nivelada, com o eixo da vara coincidente com o eixo da coluna. Em seguida, a vara é introduzida no terreno com a ajuda de um jacto de água vertical, até atingir a profundidade do limite inferior do tratamento a efectuar. No caso de se pretender obter um corpo cilíndrico, imprime-se à vara um movimento rotacional e inicia-se a bombagem de calda para o seu interior. No caso de se pretender realizar um corpo de geometria plana (painel), o processo é idêntico ao descrito, mas com uma diferença que consiste na ascensão da vara sem movimento rotacional.

Concluída a execução do corpo, retira-se a vara do furo, preenchendo-o com calda por gravidade até ao seu topo. O equipamento de furação tem também acoplado um sistema de injeção, que permite que no decorrer da subida da haste, seja injectada a calda de execução das estacas.

Como complemento da descrição anterior, apresenta-se de seguida a Figura 2.13 que ilustra as fases do método (Carreto, 2000).

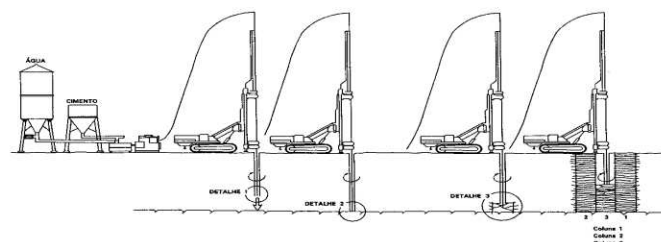


Figura 2.13 - Diagrama esquemático da técnica de melhoria de solos – *jet-grouting* (Carreto, 2000).

A nível de reorganização e reforço do solo o *jet-grouting* envolve as seguintes etapas principais (Carreto, 2000):

1º- Corte: a estrutura inicial do solo é quebrada e as partículas de solo ou fragmentos do solo são dispersos pela acção de um ou mais jactos horizontais de elevada velocidade.

2º- Mistura e substituição parcial: uma parte das partículas ou fragmentos do solo é substituída e a outra parte é misturada com a calda injectada a partir dos bicos de injeção.

3º- Cimentação: as partículas ou fragmentos de solo são aglutinadas entre si pela acção auto-endurecedora da calda, formando um corpo consolidado para oferecer a resistência necessária.

Relativamente ao **tipo de jacto utilizado**, a técnica de *jet-grouting* subdivide-se, essencialmente, em **três métodos** (Carreto, 2000):

Sistema de jacto simples ou JET1: são utilizados um ou mais jactos horizontais de calda de cimento, a grande velocidade, para simultaneamente desagregar e se misturar com as partículas de solo. Este sistema encontra-se restringido aos solos coesivos com valores do ensaio SPT⁷ inferiores a 5 a 10 pancadas e a solos incoerentes com valores de SPT inferiores a 20. Esta restrição é explicada pela resistência exercida pelos solos de maior consistência ou mais densos à acção do jacto. Efectivamente, na desagregação/corte dos terrenos é necessário empregar um esforço energético que é demasiado elevado em terrenos que não se enquadram nos limites anteriores, tornando o processo pouco eficiente e demasiado dispendioso.

Sistema de jacto duplo ou JET2: difere do simples pela utilização de ar comprimido a envolver o jacto de calda. A acção desagregadora e de mistura / aglutinação é de igual forma exercida pelo jacto de calda de elevada velocidade, sendo a envolvente de ar comprimido responsável pelo aumento do alcance do jacto. O método de jacto duplo pode ser utilizado em vários tipos de terrenos, desde argilas, a areias e a solos com cascalho. No entanto, em solos coesivos, é habitual limitar a sua utilização aos terrenos com valores de SPT inferiores a 10.

Sistema de jacto triplo ou JET3: consiste na separação das acções de coesão e de preenchimento e/ou mistura com o solo desagregado. Assim, o sistema triplo é constituído por três jactos com as funções que se indicam de seguida. O método pode ser aplicado sem restrições em qualquer tipo de solo, no entanto, em solos coesivos a sua aplicação tem sido feita, na generalidade dos casos, a solos com valores de SPT inferiores a 15.

Estes sistemas estão representados na Figura 2.14.

⁷ Standard Penetration Test.

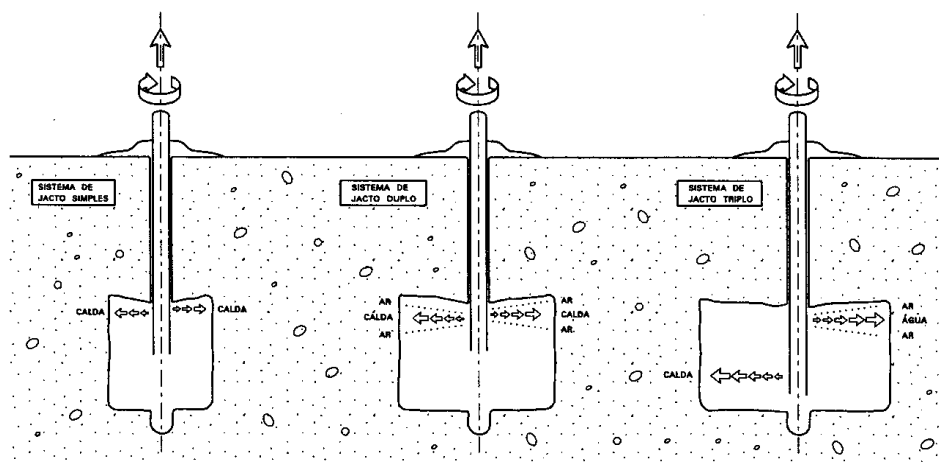


Figura 2.14 - Representação esquemática dos sistemas de *jet-grouting* (Carreto, 2000)

Cada tipo de jacto tem uma função específica, por exemplo o **jacto de água** é utilizado para destruir a estrutura do terreno. Parte da água injectada sai através do furo trazendo algum do solo erodido. No **jacto de ar** o ar é injectado através do mesmo bico de injeção de água envolvendo-a e aumentando o efeito desagregador. O jacto de ar também provoca a emulsão da mistura água – solo erodido, reduzindo a sua densidade e facilitando a sua saída para o exterior. No **jacto de calda**, a calda é injectada através de um segundo bico posicionado abaixo do bico de injeção de água e ar, mistura-se com o terreno que permanece na cavidade após a passagem do jacto de água e ar, dando origem a um corpo solidificado (Carreto, 2000).

Após execução das estacas de *jet-grouting* pode proceder-se à execução da abertura do túnel em condições de segurança melhorada.

Geralmente, a técnica de *jet-grouting* é usada: na construção em zonas urbanas de túneis de reduzido recobrimento em terrenos de características mecânicas medíocres; na consolidação de abóbadas de túneis a partir do seu interior ou a partir da superfície (para profundidades inferiores a 20 m); na consolidação de frentes de túneis em terrenos constituídos por solos moles e saturados; na criação de lajes estanques na soleira e impermeabilização de hasteais e da abóbada; na consolidação da entrada e saída de tuneladoras com escudo e para o tratamento de camadas muito permeáveis com níveis de água confinados, intersectadas pelo traçado do túnel e que podem originar transportes de solo devido às suas elevadas pressões (Carreto, 2000).

A execução da Estação do Rossio em Lisboa aplicou o método de *jet-grouting*.

2.3.1.2 Betão projectado reforçado com fibras metálicas

O betão projectado, é aplicado com a função de cintagem ou de revestimento, tendo como principais objectivos, regularizar e impermeabilizar os contornos das cavidades criadas e suportar os pequenos detritos que possam ainda encontra-se soltos após o escombramento (saneamento) estar finalizado. Este método de sustentação permite assim uma maior segurança para os trabalhadores (Guerreiro, 2000).

A utilização das fibras metálicas como complemento ou substituição total da tradicional armadura, na produção de betão reforçado, passou do campo experimental (iniciado nos anos 50), ao campo da aplicação em vários sectores da Engenharia Civil.

Actualmente, inúmeras são as aplicações onde se emprega a tecnologia do betão reforçado com fibras, como por exemplo, nos suportes para escavações superficiais e em túneis, nos quais o revestimento pode ser feito com betão projectado.

O betão projectado reforçado com fibras metálicas é composto por cimento, agregados, água, fibras metálicas e plastificantes, e é pulverizado através de um bico de ar comprimido sobre a superfície a tratar (Maccaferri, 2008).

As fibras de aço incorporadas no betão, criam uma armadura tridimensional que aumenta significativamente a resistência mecânica pós-fissuração da matriz de betão (Maccaferri, 2008).

Existem **dois métodos de betão projectado** (Maccaferri, 2008):

- 1) **Método *dry mix* (via seca)**, no qual é adicionado água durante a projecção do betão.
- 2) **Método *wet mix* (via húmida)**, no qual é acrescentada água à mistura antes da projecção concreta do betão.

A principal diferença entre betão projectado por via seca e por via húmida, reside no facto de no primeiro caso ser utilizada uma mangueira que necessita de ser manuseada manualmente, enquanto que no segundo caso, o equipamento é independente, isto é, o operador apenas manobra o braço mecânico através de comandos. Também diferem no tempo de presa do betão, uma vez que em betões projectados por via húmida, o tempo de presa dependerá da razão água/cimento da mistura de betão, enquanto nos betões projectados por via seca o tempo de presa é afectado pela quantidade de água adicionada pela própria máquina durante a projecção.

Este método apresenta **as seguintes vantagens**: melhora a dureza, a resistência à flexão, aumenta a resistência à tracção e corte, reduz a retracção do betão reduzindo a fissuração, melhora a segurança do trabalhador ao evitar o uso de mão-de-obra que estaria exposta ao risco de desprendimentos de maciços durante a colocação da armadura, pois não há necessidade de colocar uma malha soldada de reforço para reduzir o risco de colapso ou falha inesperada do túnel. Com este método é otimizada a espessura da camada de betão projectado, reduz-se a duração da construção do túnel, aumenta-se a tenacidade e reduz-se a espessura do revestimento.

O betão armado com fibra de aço pode ser colocado *in situ* ou bombeado para o local e pode ser utilizado no revestimento final do túnel.

É de notar, que por vezes, são adicionadas à mistura, fibras sintéticas usadas para protecção contra incêndios.

2.3.1.3 Reforço com anéis pré-fabricados⁸

Este sistema é utilizado quando a escavação é realizada de forma automatizada através da utilização de máquinas conhecidas como TBM's, referidas anteriormente. O revestimento realizado com aduelas pré-fabricadas tem função de revestimento final e de apoio para a TBM na fase de avanço da escavação. As aduelas podem ser fabricadas usando betão reforçado com fibras de aço, recomendadas quando as condições de carga na fase de escavação da TBM são baixas. As aduelas pré-fabricadas encontram-se ilustradas na Figura 2.15.



Figura 2.15 - Aduela pré-fabricada da MACCAFERRI (Maccaferri, 2008).

O revestimento final de suporte do túnel deve garantir uma adequada segurança estrutural, absorvendo as cargas de serviço de acordo com os critérios estabelecidos em projecto. Este revestimento pode ser um processo executado *in situ*, sendo para isso necessário preparar as armaduras necessárias e colocá-las no local, ou podem ser utilizados

⁸ Aduelas pré-fabricadas

elementos pré-fabricados, aduelas pré-fabricadas, que, quando a escavação é realizada de forma automatizada através da utilização de máquinas como a TBM, eliminam todas as fases de armação e betonagem.

A utilização de aduelas pré-fabricadas apresenta **vantagens** pois permite uma melhor qualidade de acabamento, maior resistência mecânica devido ao processo produtivo industrializado, maior produtividade na fabricação das aduelas, devido à substituição total ou parcial da armadura, maior resistência aos impactos durante o transporte e instalação, menores espessuras de revestimento, sendo possível reduzir ou eliminar a camada de recobrimento e maior durabilidade em ambientes agressivos (Maccaferri, 2008).

O túnel de Listolade Belluno-Itália e o túnel Piloto la línea Armênia - Colômbia assim como significativos troços do Metro do Porto e de Lisboa foram realizados com o uso de aduelas pré-fabricadas.

2.3.1.4 Reforço usando painéis metálicos

Nos últimos anos, com os problemas ocorridos de degradação do betão de revestimento de túneis, tais como fissuras, destacamento e deformação devido ao envelhecimento, transformação terrestre, terremotos ou outros factores externos ou internos, levaram à manutenção de túneis, usando uma base contínua, enquanto se procede à reparação e reforço dos seus revestimentos de betão. Este método permite uma rápida construção do reforço das paredes (Kiriyama *et al.*, 2005)

Neste método, os painéis feitos de chapa de aço são aplicados na superfície interior do túnel a ser reforçado. As suas formas são ajustadas, utilizando uma barra, denominada *spacer* que serve para cobrir uma lacuna entre o painel e o revestimento existente. Assim, este método de reforço pode ser aplicado para evitar nomeadamente o destacamento de betão e para restringir perturbações do terreno (Kiriyama *et al.*, 2005).

Na Figura 2.16 está esquematizada a forma como os painéis metálicos são usados.

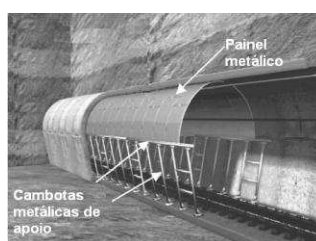


Figura 2.16- Reforço com chapas de aço (Adaptado de Kiriyama *et al.*, 2005).

Existem **três tipos de painéis** (Kiriya *et al.*, 2005):

1) **Os grandes painéis**: uma única chapa de aço é instalada circularmente por acção de energia mecânica.

2) **Painel de dimensão média**: chapas de aço são instaladas circularmente por acção de energia mecânica. O tamanho do painel é de 8 mm de espessura, 1000 mm de largura e de 2000 a 3000 mm de comprimento. Os painéis são colocados com um veículo especial, equipado de um mecanismo detentor de painéis, designado "montador". Esta máquina permite a rápida montagem dos painéis.

3) **Painel de pequena dimensão**: pequenos pedaços de chapa de aço são instalados circular e manualmente. Os painéis apresentam peso inferior a 30 kg/peça, 8 mm de espessura, 400 mm de largura e 1000 mm de comprimento. Este tipo de painéis é usado em túneis de pequenas dimensões onde a entrada do veículo de colocação não é possível.

2.3.1.5 Estabilizações com recurso a ancoragens ou pregagens

A estabilização temporária ocorre imediatamente a seguir à escavação e tem por objectivo estabilizar a cavidade, de forma a garantir a segurança dos trabalhos futuros e garantir a geometria de projecto (Bastos, 1998).

Alguns sistemas já foram referenciados no método NATM, entre os quais as pregagens e ancoragens.

A sustentação por pregagens (ilustradas na figura 2.10 e 2.11) e por ancoragens (ilustradas na figura 2.9) diferem entre si, fundamentalmente, pela dimensão envolvida do maciço a sustentar. Enquanto as pregagens têm a função de suportar blocos instáveis, tendo uma função pontual, as ancoragens destinam-se a fornecer ao maciço uma acção de confinamento, permitindo aproveitar as suas características próprias de sustentação. Assim, a aplicação de **pregagens** é utilizada em maciços autosustentados, em que existam instabilidades apenas em blocos isolados. Relativamente às **ancoragens**, estas constituem um suporte com aplicação igualmente de elementos pontuais, que actuam globalmente, mas usado em maciços plastificados (Bastos, 1998).

O método de **pregagem** consiste num sistema pontual de sustentação, que trabalha por atrito através do contacto contínuo com as paredes do furo. O recurso frequente a este

método prende-se com o facto das mesmas apresentarem as seguintes características (Guerreiro, 2000):

- versáteis – podem ser utilizadas em qualquer tipo de geometria de escavações;
- simplicidade na instalação;
- baixo custo – são baratas relativamente ao efeito estabilizante;
- racionais – podem ser aplicadas através de mecanização total;
- podem ser combinadas com outros sistemas de suporte, como as redes metálicas ; o betão projectado;
- a frequência de aplicação pode ser variável de acordo com o tipo de rocha.

Os principais tipos de pregagens são os seguintes (Hoek et al., 1998):

- pregagens cimentadas (barra de aço cimentada);
- pregagens de atrito ou *Split Set* (tubo com rasgo longitudinal e diâmetro superior ao do furo que entra à força, promovendo uma acção de atrito);
- pregagens do tipo *Swelllex* (tubo em forma de C que abre, por pressão hidráulica, quando colocado no furo, promovendo uma acção de atrito).

Na Figura 2.17 ilustram-se os três tipos de pregagens referidos, sendo observáveis as principais diferenças entre elas.

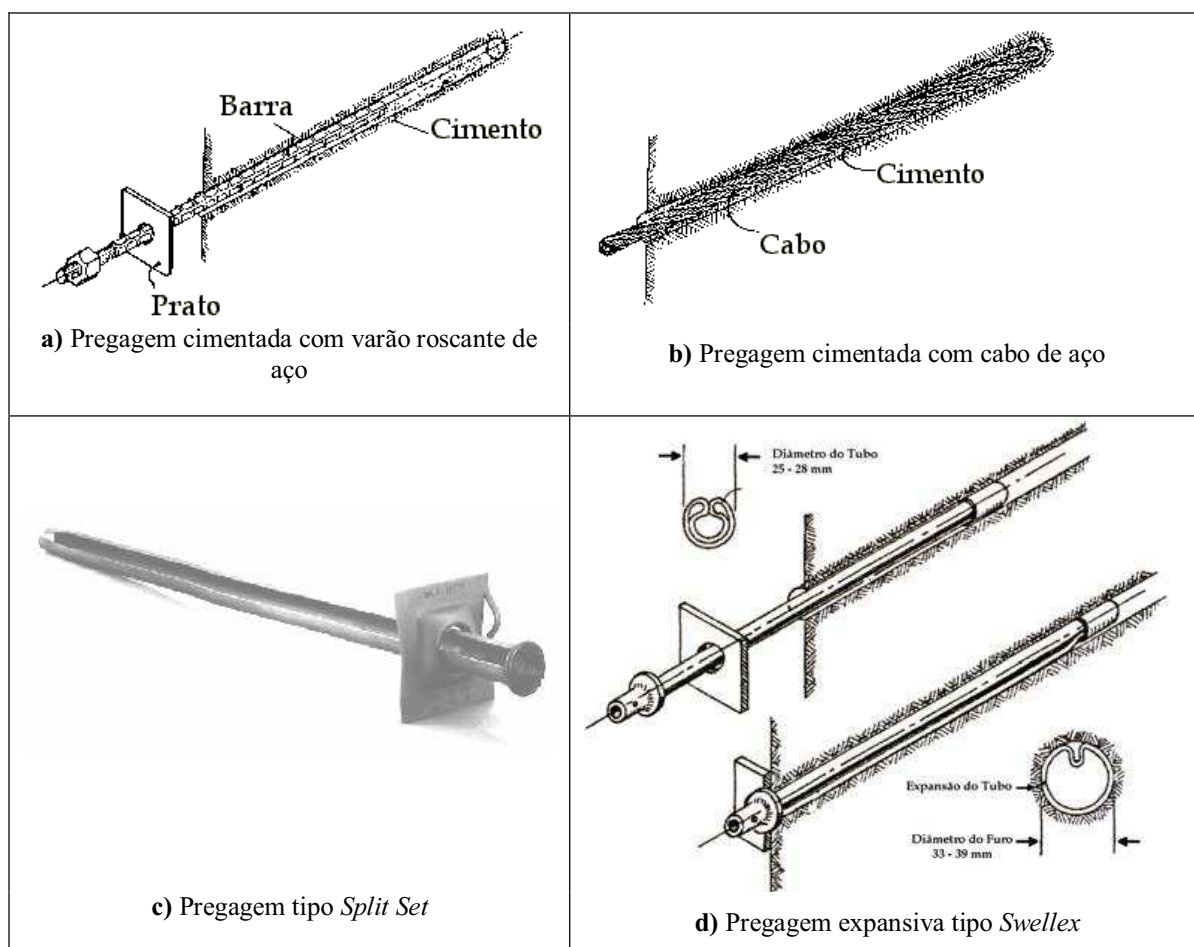


Figura 2.17 - Tipos de pregagens (adaptado de Hoek e tal., 1998).

Relativamente às pregagens **expansivas tipo *Swellex***, estas funcionam através de atrito na parede do furo, sendo constituídas por um tubo em forma de C, no qual é aplicada água com uma pressão hidráulica de 30 MPa para a expansão do tubo, o qual apresenta uma resistência à tracção de 11,5 toneladas. Este tipo de pregagem pode ser denominado como temporárias pelo facto de apresentarem um tempo de vida útil de cerca de 25 anos. Este facto revela-se uma **desvantagem** deste sistema e a sua baixa vida útil é devida à corrosão do tubo. Este problema tem vindo a ser melhorado através do uso de revestimentos anti-corrosão. No entanto este método torna-se bastante **vantajoso** pois permite uma aplicação rápida fornecendo um reforço instantâneo das acções das rochas macias, onde o tempo é um factor crucial (Guerreiro, 2000).

“Durante as últimas décadas o uso das pregagens tornou-se mais e mais difundido. E por boas razões. O uso das pregagens é um método muito flexível que pode ser combinado com malhasol, betão projectado e revestimento em betão para lidar com quase

todas as situações encontradas durante a perfuração e abertura de túneis” (AtlasCopco, 2008)

“A utilização do Swellex tem crescido rapidamente no mundo, num vasto campo durante os últimos anos, não só em rochas duras (alta resistência e altos módulos de deformação), mas também em rochas macias (baixa resistência e baixos módulos de deformação)” (Li e Håkansson, 1999)

A forma de funcionamento da Swellex é muito simples. É fabricada a partir de um fino tubo de aço dobrado em forma de C como já foi referido. São pressionadas buchas em ambas as extremidades do tubo, as quais são então seladas através de soldadura. A bucha tem um pequeno orifício por onde a água é injectada no tubo a alta pressão, cerca de 30 Mpa, para o expandir. Durante o processo de expansão, a Swellex comprime a rocha em torno do orifício, e adapta-se de forma a encaixar-se nas irregularidades da mesma de forma a sustentar o bloco instável (Li e Håkansson, 1999). A Figura 2.18 ilustra a forma como o tubo se deforma e se adapta ao orifício.

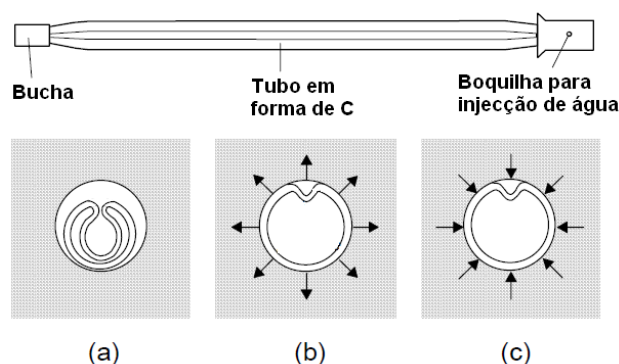


Figura 2.18 - Modo de funcionamento da pregagem Swellex e da interacção entre a rocha e o tubo: (a) Colocação da Swellex no orifício, (b) O tubo é expandido sob alta pressão de água, (c) A pressão da água é libertada. (adaptado de Li e Håkansson, 1999).

Para alcançar um reforço efectivo, a Swellex deve preencher dois requisitos (Li e Håkansson, 1999):

- 1- Um contacto principal deve ser estabelecido entre o furo do parafuso e a parede, de forma a aumentar o atrito de amarração do tubo, devido à diferença entre a rigidez do tubo e do furo.

- 2- O tubo deve estar perfeitamente adaptado às irregularidades do furo na parede, após a expansão, de forma a alcançar uma interligação mecânica.

As **ancoragens**, ao contrário das pregagens, constituem elementos de suporte activo, devido ao facto de poderem ser tencionadas, exercendo uma acção de suporte independentemente da movimentação dos elementos a suportar. Estas são também conhecidas por método de sustentação suspenso e utilizam-se com muita frequência para melhorar a auto-sustentação do maciço e evitar a queda de blocos mais ou menos individualizados. Na aplicação de ancoragens numa determinada escavação torna-se necessário estudar um conjunto de parâmetros característicos deste sistema (Guerreiro, 2000):

- **a inclinação** - depende da orientação do estado de tensão, e/ou da existência de diáclases, ou de outras superfícies de baixa resistência;
- **o comprimento** - deverá ser estabelecido de acordo com a inclinação dada e com a espessura da zona fracturada que se pretende sustentar;
- **a tensão inicial de aperto (ou de montagem)** - depende das características de deformabilidade e de resistência do terreno. O valor da tensão inicial deve ser inferior à resistência à tracção da respectiva haste;
- **a tensão máxima admissível** - valor de tensão a que a ancoragem ficará sujeita na sua vida útil (deverá ter em conta a resistência da haste);
- **o espaçamento** - é determinado, fundamentalmente, de acordo com as características mecânicas dos terrenos, da resistência ao escorregamento das fixações e das tensões iniciais aplicadas;
- **a resistência ao escorregamento da fixação** - depende das características do terreno e do sistema de fixação utilizado.

Para se aplicarem as ancoragens são previamente abertos furos na rocha com martelos perfuradores, geralmente telescópicos, semelhantes aos utilizados para as pregagens, ou com martelos montados nos braços do “jumbo”⁹. Este equipamento encontra-se representado nas Figuras 2.19 e 2.20.

⁹ **Jumbo** – Equipamento de perfuração com braços móveis. Equipamento utilizado para abertura de furo para colocação de explosivos, pregagens entre outros.

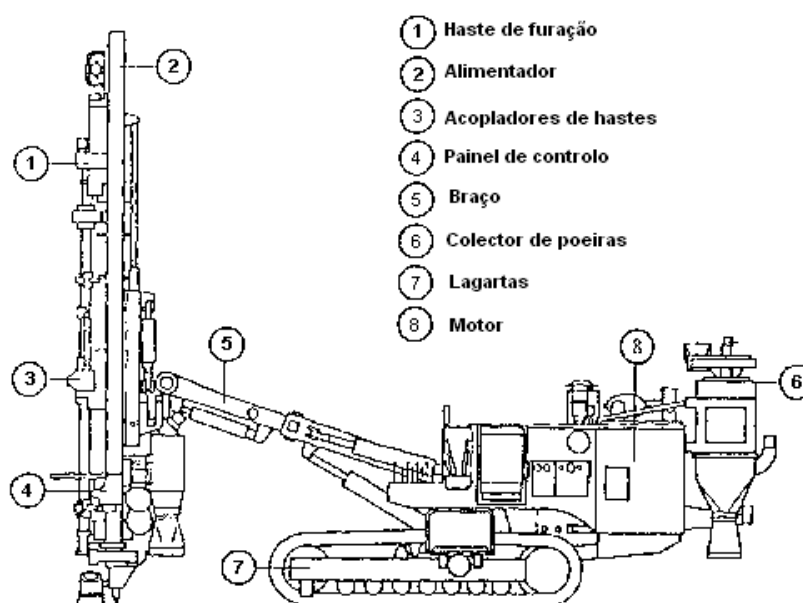


Figura 2.19 - Componentes principais de um Jumbo de furação de bancada (Adaptado de Tamrock, 1984 *cit in* IGM¹⁰ (1999))



Figura 2.20 - Jumbo de furação para colocação de Swellex na obra de Picote II (Picote II (A), 2009).

Os principais tipos de ancoragens actualmente disponíveis no mercado são os seguintes (Hoek, 1998):

- **ancoragens mecânicas** - a fixação às paredes do furo é promovida por uma cunha mecânica;
- **ancoragens com resina** - a fixação do elemento de ancoragem às paredes do furo é realizada por meio de resina.

¹⁰ Instituto Geológico Mineiro

Na Figura 2.21 ilustram-se os dois tipos de ancoragens.

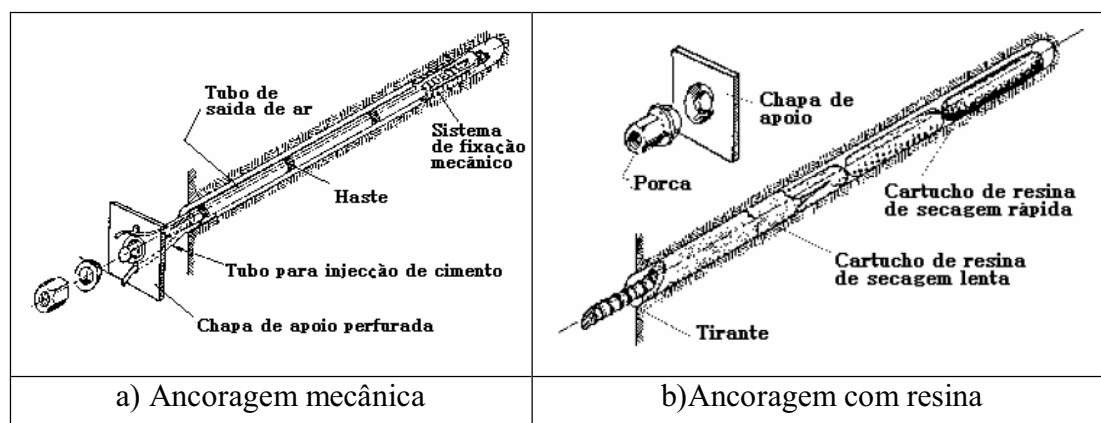


Figura 2.21 - Tipos de ancoragens disponíveis no mercado (Hoek et al., 1998).

Quando as ancoragens são realizadas para se manterem activas num grande intervalo de tempo, recorre-se à betonagem entre o furo e a haste da ancoragem, de forma a prevenir fenómenos de corrosão provocados pela água subterrânea. Nestas betonagens são utilizadas caldas de secagem rápida. Para fazer face a este problema, pode também recorrer-se à utilização de resinas. Quando o tempo de actuação necessário é curto ou quando são aplicadas em terrenos não propícios ao fenómeno de corrosão, não existe a necessidade de betonar as ancoragens (Guerreiro, 2000).

O tensionamento de ancoragens pode ser realizado normalmente através de um *torgue*¹¹ (Figura 2.22) ou mecanicamente com auxílio de um tensiómetro hidráulico.

No caso da vizinhança do contorno não se apresentar suficientemente firme para a fixação das ancoragens tradicionais, utilizam-se as ancoragens por cabos. Este método de sustentação é geralmente utilizado para grandes comprimentos, da ordem das dezenas de metros (Guerreiro, 2000).



Figura 2.22 – Torgue (REFER, 2008).

¹¹ **Torgue** – equipamento mecânico usado para aplicar o tensionamento nas ancoragens.

2.3.1.6 Uso de rede metálica

A utilização de **rede metálica** (ilustrada na Figura 2.6), tipo malhasol, é aplicada conjuntamente com as cambotas metálicas, pregagens ou ancoragens, cujas cabeças servem como elemento de fixação, tal como se mostra na Figura 2.23 (Bastos, 1998).

Estes sistemas de suporte são utilizados para evitar a queda de pedras e de blocos individualizados, sendo muitas vezes aplicadas em maciços que apresentem fracturação muito intensa (Guerreiro, 2000).

Existem dois tipos de redes metálicas que são utilizadas no segurança de cavidades subterrâneas (Guerreiro, 2000):

- **Rede metálica corrente:** esta rede é utilizada para suportar pedras ou blocos individualizados, dependendo da sua capacidade de carga e do espaçamento entre os seus pontos de suporte. Esta rede não pode ser utilizada com betão projectado porque tem uma malha muito pequena e gera a criação de vazios no interior da camada de betão projectado.

- **Rede electrossoldada:** esta rede pode ser galvanizada de forma a minimizar os efeitos da corrosão e é geralmente utilizada para reforço do betão projectado, o qual deve envolver toda a rede para que esta não sofra efeitos de corrosão.

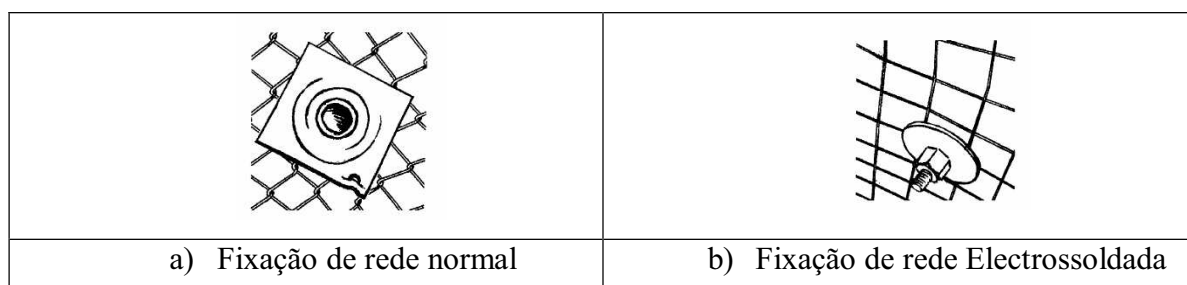


Figura 2.23 – Aplicação de redes metálicas (Guerreiro, 2000).

2.3.1.7 Uso de cambotas metálicas

A entivação por **cambotas metálicas** (ilustrada na figura 2.5) com por exemplo perfis com secções H, U entre outros, é utilizada em solos e rochas muito fracturadas. Este sistema tem **vantagens**, nomeadamente as excelentes resistências mecânicas aos esforços de tracção e de compressão, resiste a elevados momentos de flexão; possui elevado módulo de elasticidade e ductilidade; é de fácil fabrico e modelação; apresenta homogeneidade e é de fácil controlo de qualidade e modo de actuação no terreno, em condições favoráveis

após o seu limite elástico. As **desvantagens** destes elementos prendem-se com os custos associados, agravados pelos tratamentos anti-corrosão tais como a galvanização (Bastos, 1998).

2.3.1.8 Uso de enfilagens

As **enfilagens** ilustradas na Figura 2.8 são utilizadas para o reforço do maciço de solo acima da abóbada do túnel, de forma a possibilitar a escavação. Este método é usado em solos de baixa resistência. As enfilagens podem ser constituídas por perfis metálicos de aço, cravados no solo ou por perfis e tubos de aço, introduzidos no solo através de perfurações e submetidos à injeção de calda de cimento (Vieira, 2003).

2.4. PREVENÇÃO DE RISCOS PROFISSIONAIS

2.4.1. Aspectos normativos de segurança

Um trabalho bem feito não é necessariamente sinónimo de um trabalho executado em segurança, desta forma, qualquer trabalho deve ser executado em segurança tanto para o trabalhador como para terceiros, cumprindo no mínimo, a implementação das exigências legais. A construção de um túnel é um dos desafios mais complexos no campo da Engenharia, que implica a utilização de métodos específicos, aos quais estão associados elevados riscos.

É vasta a publicação de diplomas legais no âmbito da segurança e saúde do trabalho. No entanto, a respectiva implementação numa obra de reconhecida complexidade deve estar incluída num sistema de gestão de segurança e saúde. As normas contendo as especificações para a implementação destes sistemas de gestão surgiram com a família das **US OSHA Insurance of Management Guidelines 1989**. Surgiu posteriormente o Sistema de Gestão de Saúde e Segurança Ocupacional, através da **OHSAS 18001:1999**, que foi desenvolvida e começou a ser aplicada em Abril de 1999, inicialmente baseado na **BS 8800:1996** – Directrizes para Sistemas de Gestão de Saúde e Segurança Ocupacional. Estas especificações foram aplicadas em Portugal através da **NP 4397:2001**. Recentemente a **OHSAS 18001:1999** foi modificada através da **OHSAS 18001:2007**, as quais aplicadas em Portugal vão dar origem a uma nova versão da NP 4397:2001, actualmente designada por prNP 4397:2008 (Wang, 2007).

A Norma Portuguesa **NP 4397:2001** foi desenvolvida para responder à necessidade sentida pelos interessados na existência de uma norma que contenha os requisitos para a implementação e certificação de Sistemas de Gestão da Segurança e Saúde do Trabalho.

Sendo uma norma de aplicação facultativa a conformidade de qualquer sistema de gestão com a prNP 4397:2008, não dispensa o cumprimento das obrigações legais.

A *British Standards Institution* (BSI) publicou, em Julho de 2007, a segunda edição da Norma OHSAS 18001:2007. Esta nova edição conclui mais de três anos de trabalho do grupo de trabalho das OHSAS, composto por organismos de certificação internacionais, organismos de normalização e outras entidades e pessoas individuais, responsáveis pelo desenvolvimento e manutenção da OHSAS 18001, tendo iniciado em Julho o trabalho de revisão da norma de interpretação a OHSAS 18002 (SGS, 2007).

De acordo com a introdução da OHSAS 18001:2007, *“A OHSAS 18001 foi desenvolvida para ser compatível com as normas de gestão ISO 9001:2000 (qualidade) e ISO 14001:2004 (ambiente), a fim de facilitar a integração dos sistemas de gestão da saúde e segurança no trabalho, com os sistemas de gestão ambiental e com os sistemas de gestão da qualidade, caso as organizações o pretendam fazer”* (SGS, 2007), consolidando em relação à primeira edição um alinhamento com a ISO 14001 e melhorando a compatibilização com a ISO 9001. Esta revisão teve em consideração a ISO 9001, a ISO 14001, as ILO-OHS¹² *Guidelines* e outras normas e publicações sobre Sistemas de Gestão de Segurança e Saúde do Trabalho - SGSST (Teixeira, 2008).

As alterações introduzidas pela OHSAS 18001:2007 vêm atribuir uma maior importância à componente “saúde” e incluem novas definições e a revisão de algumas já existentes, nomeadamente (Teixeira, 2008 e Wang, 2007):

- Alteração da designação de “**risco tolerável**” para “**risco aceitável**”, risco que foi reduzido a um nível que pode ser tolerável pela organização tendo em consideração às exigências legais e à sua própria política de SST.

- A definição do termo “**perigo**” deixou de se referir aos danos à propriedade ou aos danos ao ambiente do local de trabalho e passou a referir-se a ferimentos, danos para a saúde ou morte.

- O termo “**acidente**” é incluído agora no termo “**incidente**” definido como evento(s) relacionado(s) com o trabalho no(s) qual(is) **ocorreu ou poderia ter ocorrido, um**

¹² ILO-OHS *Guidelines* – International Labour Organisation – Occupational Health and Safety Guidelines

ferimento, dano para a saúde, ou uma fatalidade. Um acidente é um incidente do qual resulta ferimentos, dano para a saúde ou morte. Um incidente onde não ocorra dano, doença ou fatalidade pode ser referenciado como um “quase-acidente”.

- **Perigo** é a propriedade ou capacidade intrínseca (física, química, biológica,...) de materiais, substâncias, produtos, máquinas, equipamentos, métodos e práticas de trabalho, potencialmente causadora de danos às pessoas (ferimentos, danos à saúde, morte).

- **Risco** é a combinação da probabilidade da ocorrência de um evento perigoso ou exposição(ões) e a severidade do dano ou doença que pode ser causada pelo evento ou exposição(ões).

- **Avaliação de risco**, processo de avaliação de risco(s) com origem no(s) perigo(s), levando em consideração a adequabilidade de um controle existente, e decisão se o risco é ou não aceitável.

Existem novos termos definidos na OHSAS 18001:2007 para harmonização com a terminologia da ISO 14001 e da ISO 9001 (Managing risk, 2007). Como novas definições surgiram (Teixeira, 2008 e Wang, 2007):

- **Política de SST**: nova definição adaptada da ISO 14004, com referência explícita à gestão de topo e que trata de intenções da direcção geral de uma organização, relacionados com o seu desempenho de SST expressado formalmente pela alta administração.

- **Local de Trabalho**: qualquer localização física na qual ocorrem actividades associadas ao trabalho, sob o controlo da organização.

- **Acidente**: é um incidente que originou ferimento, dano para a saúde ou fatalidade.

- **Acção correctiva**: acção para eliminar a(s) causa(s) de um não conformidade detectada ou outra situação indesejada.

- **Doença profissional**: condição identificável, adversamente física ou mental, surgida de e/ou piorada pela actividade do trabalho e/ou por situação relacionada ao trabalho.

- **Acção preventiva**: acção para eliminar a(s) causa(s) de uma potencial não conformidade ou situação potencialmente indesejável.

- **Procedimento**: modo especificado de executar uma actividade ou processo

- **Registo**: documento demonstrando resultados alcançados ou provendo evidência de actividades executadas.

-Ambiente de trabalho: qualquer localização física na qual actividades relacionadas com o trabalho são desempenhadas sob o controle da organização.

2.4.2. Segurança dos trabalhadores

A segurança dos trabalhadores passa por uma boa e segura utilização dos meios usados para a execução das tarefas. Desta forma deve-se proceder à formação, informação e sensibilização dos trabalhadores sobre os riscos associados e sobre os benefícios e obrigatoriedade do uso dos EPC's¹³ e EPI's¹⁴ de forma a controlar os riscos.

O controlo das tarefas desempenhadas dentro da obra é essencial para fornecer condições seguras de trabalho e para garantir a segurança dos trabalhadores durante a execução do túnel. É na fase de projecto que os meios técnicos têm de ser utilizados ou concebidos de modo a que, se promova e planeiem todos os mecanismos de forma a garantir a segurança da obra na fase de construção e de serviço.

2.4.3. Acidentes ocorridos em túneis

Os últimos quinze anos foram marcados por um aumento do número de acidentes em obras subterrâneas, em todo o mundo, pois houve um aumento significativo destas obras, nas quais tem sido utilizado pessoal não qualificado para o efeito. A tendência de contratos por preço global, sem o devido controle, condições contratuais unilaterais e cronogramas apertados impostos pelos donos da obra, orçamentos baixos e competição apertada nos concursos de adjudicação, também foram causadores desse aumento de sinistralidade. A confiança excessiva em certos métodos construtivos, ou em certos ambientes, também influenciou o aumento de acidentes.

Na sequência dos acidentes ocorridos nos últimos anos, têm sido feitos esforços de forma a identificar as suas causas. Com este intuito, foram desenvolvidos trabalhos citados na revista *Téchne*, 2008, entre os quais se destacam o do *Health and Safety Executive* - HSE (1999, 2000 e 2006) (cit. in Revista *Téchne*, 2008), depois do acidente de *Heathrow* no Reino Unido e, no Brasil, o trabalho de Ribeiro Neto (1999) (cit. in Revista *Téchne*, 2008), que fala sobre acidentes em túneis urbanos. Mais recentemente, Seidenfuss (2006) (cit. in Revista *Téchne*, 2008) apresentou estatísticas sobre 110 acidentes ocorridos em túneis em vários países nos últimos 70 anos, nas quais se identificam as datas de

¹³ EPC – Equipamentos de Protecção Colectiva.

¹⁴ EPI – Equipamento de Protecção Individual.

ocorrência, o nome do empreendimento, a localização, o método construtivo utilizado, as condições de maciço, o tipo de colapso, as causas e as consequências (Revista Técnica, 2008).

As **principais categorias de causas identificadas** foram (Revista Técnica, 2008):

- condições geológicas não previstas (diferente de não previsíveis);
- erros de concepção de projecto, de cálculos, e dimensionamentos e de decisão de engenharia (concepção estrutural, especificações técnicas e de controle deficientes, parâmetros, modelos constitutivos, hipóteses e tipos de simulação inadequados, etc.);
- erros de construção (qualidade e quantidade de materiais empregados, meios e métodos inadequados, violações de projecto etc.);
- erros de concepção de projecto e de riscos associados, inclusivamente o controle da qualidade, comunicação e organização.

As Figuras 2.24, 2.25 e 2.26 apresentam os resultados estatísticos do trabalho desenvolvido por Seidenfuss (2006) (cit. in Revista Técnica, 2008), que evidencia as principais causas que estiveram na origem de acidentes de trabalho em túneis, os tipos de colapso que ocorreram e a incidência por processo construtivo.

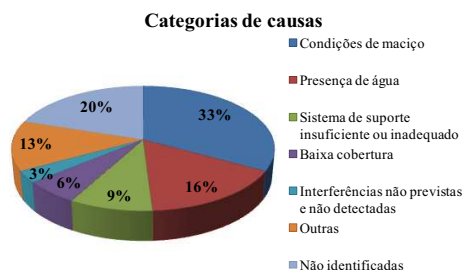


Figura 2.24 - Principais categorias de causas de acidentes de trabalho em túneis

(Adaptado de Seidenfuss, 2006 cit. in Revista Técnica, 2008).



Figura 2.25 - Tipos de colapsos ocorridos em túneis (Adaptado de Seidenfuss, 2006 cit. in Revista Técnica, 2008).

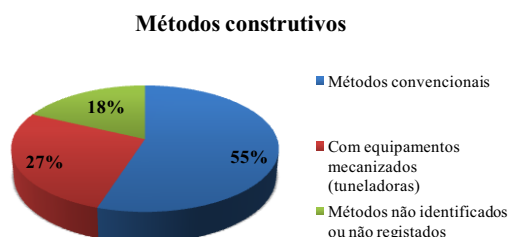


Figura 2.26 - Incidência de acidentes de trabalho em túneis por método construtivo
(Adaptado de Seidenfuss, 2006 cit. in Revista Técnica, 2008).

Desta análise verifica-se que as condições do maciço e as condições de suporte inadequadas ou insuficientes representam 42% das causas que levam entre outras ao colapso devido a rupturas localizadas do maciço circundante e a rupturas até à superfície, ambas representando 80% dos tipos de colapsos ocorridos. Os métodos construtivos convencionais são aqueles que apresentam maior incidência de acidentes.

Em 2006/2007, o *International Tunneling Insurance Group* – ITIG, durante os congressos mundiais de túneis da Associação Internacional de Túneis e do Espaço Subterrâneo (ITA), **apresentou datas de ocorrência de acidentes em determinados países**, e as razões que levaram as seguradoras a propor directrizes para a gestão de riscos em obras subterrâneas, como a forma mais eficiente para reduzir o número de acidentes e as respectivas consequências (Revista Técnica, 2008).

Tabela 2.1 - Colapsos em túneis (ITIG, 2006 e 2007, adaptado da Revista Técnica, 2008).

EMPREENHIMENTO	PAÍS	ANO DE COLAPSO
Metro de Munique	Alemanha	1994
Heathrow Express Link	Reino Unido	1994
Metro de Taipei	Taiwan	1994
Metro de Los Angeles	EUA	1995
Metro de Taipei	Taiwan	1995
Túnel Hull-Yorkhire	Reino Unido	1999
TAV Bologna-Florença	Itália	1999
Metro Taegu	Coreia do Sul	2000
TAV Bologna-Florença	Itália	2000
TAV Taiwan	Taiwan	2002
Metro de Xangai	China	2003
Metro Linha Circular	Cingapura	2004
Metro Barcelona	Espanha	2005
Metro M2 Lausanne	Suíça	2005
Túnel Lane Cove, Sydney	Austrália	2005
Metro Kaohsiung	Taiwan	2005

“Se por um lado, os acidentes implicam severas perdas e são sempre traumáticos para todos os intervenientes, por outro lado, contribuem para importantes aprendizagens em termos de engenharia, de modo a melhorarem-se os métodos construtivos de forma a torná-los mais eficazes e mais seguros. Nesse sentido, a análise das estatísticas apresentadas mostra que os acidentes podem ocorrer em qualquer lugar, independentemente do tipo de contrato, do método construtivo e da finalidade da obra. Embora a existência de riscos associados a obras subterrâneas seja notória, a maioria dos acidentes ocorre devido a causas ou factores múltiplos, ligados a falhas em processos de engenharia, ou seja, nas investigações geológico - geotécnicas, no projecto, na construção ou na monitorização de riscos (identificação, controle, organização, comunicação, ...). A forma mais eficiente de reduzir o número de acidentes e as suas consequências é a valorização das boas práticas de engenharia nas diferentes fases do empreendimento, associada a um plano eficiente de monitorização de riscos” (Revista Técnica, 2008).

Obteve-se ainda o registo de outro grande acidente que ocorreu na Estação Pinheiros, da Linha 4 do Metro de São Paulo, (Brasil) em 12/01/2007. Neste acidente foram identificadas como causas do colapso a ruptura brusca da superfície, comportamento do maciço como um "bloco" e a magnitude dos deslocamentos. Em consequência houve falta de arqueamento e recalque assimétrico das fundações do revestimento, formando-se então o mecanismo descrito (Maffei, Mello *et al.*, 2008).

Em Portugal há registo dos seguintes acidentes em obras subterrâneas ou que foram consequência das mesmas:

- Em 2001, uma mulher morreu na cidade do Porto, em Portugal, quando a sua casa desabou devido à construção de um túnel do metro da cidade (Loyola *et al.*, 2007).
- A 5 de Maio de 2003, no Empreendimento Venda Nova II “Reforço de potência do aproveitamento hidroeléctrico de Venda Nova”, ocorreu um acidente na boca de um poço, na chaminé de equilíbrio superior – CES, quando se encontravam a trabalhar no local quarenta e três trabalhadores, do qual resultaram dois mortos e seis feridos (ACT Lisboa, 2009).

3. MATERIAIS E MÉTODOS (FMEA - FMECA)

3.1. INTRODUÇÃO

No dia-a-dia tomam-se decisões que envolvem risco, os quais muitas das vezes são admitidos como não relevantes por apresentarem uma baixa probabilidade de acontecer. No entanto, por mais baixa que seja a probabilidade é necessário identificá-los e preveni-los para que as tarefas sejam desempenhadas de forma segura e eficiente. Uma das formas de o fazer, passa pela utilização/aplicação de técnicas que permitam diagnosticar potenciais falhas logo na fase de projecto, tais como o FMEA e/ou o FMECA.

Desta forma, devido à sua elevada importância para o objectivo do trabalho, é efectuado um estudo sobre o Método de Análise de Falhas e Efeitos – FMEA (*Failure Modes and Effects Analysis*), de forma a compreender-se o seu modo de funcionamento, para a sua correcta aplicação às diferentes técnicas de estabilização de túneis, de forma a poder avaliar os seus níveis de fiabilidade construtiva e de segurança.

Na Engenharia, a construção e estabilização de túneis apresenta desafios e complexidade, sendo essencial atingir-se elevados níveis de segurança, em todas as fases da construção, estabilização e exploração, para se prevenir a ocorrência de falhas que possam originar incidentes ou acidentes.

Antes de se proceder à definição propriamente dita do FMEA, é fundamental fazer um enquadramento histórico do mesmo.

O FMEA foi implementado em Novembro de 1949 para uso militar das Forças Armadas dos Estados Unidos da América, no processo militar MIL-P-1629, para classificar as falhas, de acordo com o impacto que as mesmas teriam nas diversas missões e na segurança dos militares e equipamentos (FMEA, 2009).

Mais tarde, foi utilizado na indústria aeroespacial pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), no desenvolvimento do programa espacial Apollo, com o objectivo de eliminar falhas em equipamentos que ficariam impossibilitados de ser reparados após lançamento (FMEA, 2009).

A indústria automóvel foi também um precursor deste método, implementado no final da década de setenta pela *Ford Motor Company*, onde serviu para quantificar e ordenar os

defeitos potenciais ainda na fase de projecto, impedindo que essas falhas chegassem ao cliente final (FMEA, 2009).

Segundo a C.N.P.G.B¹⁵ (2005:8) “O FMEA é um método de análise de riscos qualitativo, que pode ser adaptado para a realização de análises semi-quantitativas – designando-se então por FMECA (análise dos modos de falha, dos seus efeitos e severidade) – através da aplicação de escalas de probabilidade de ocorrência das falhas e de gravidade dos seus efeitos. Permite assim caracterizar a importância no funcionamento do sistema de cada um dos modos de falha, o impacto que estes têm sobre a sua fiabilidade e a dimensão das respectivas consequências.”

Desta forma, o símbolo **C** na sigla FMECA indica que, além da análise do modo de falha FMEA, é feita uma análise de criticidade do mesmo.

Segundo Stamatis, (2003:294) FMEA é uma ferramenta real de engenharia que:

1. Ajuda a definir, identificar e eliminar as conhecidas e /ou potenciais falhas do sistema, desenho, ou do processo. O objectivo é eliminar os modos de falha ou reduzir os seus riscos.
2. Fornece conteúdo para uma análise crítica do processo.
3. Facilita o diálogo entre departamentos (é muito mais do que uma revisão do projecto.)
4. Em última análise, ajuda a prevenir as falhas.
5. Identifica potenciais produtos ou processos relacionados com os modos de falha.
6. Determina o efeito e a gravidade destes modos de falha.
7. Identifica as causas e as probabilidades de ocorrência da falha.
8. Quantifica e hierarquiza a prioridade dos riscos associados com o modo de fracasso.
9. Desenvolve documentos e planos de acção de forma a reduzir o risco.

Segundo Stamatis (2003) *cit in* Fernandes (2005), o principal objectivo da realização do FMEA é a necessidade de melhoria dos processos produtivos. Para se obter o máximo benefício do FMEA, é necessário que o método esteja integrado e implementado na cultura da organização, devendo tornar-se não somente um documento do Sistema da Qualidade, mas sim uma ferramenta que deve ser utilizada no dia-a-dia.

¹⁵ Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens

O FMEA deve sofrer uma revisão, sempre que existam (Fernandes, 2005):

- alterações nas condições de um sistema, produto, processo ou serviço;
- alterações que possam modificar a gravidade ou impacto da falha, ou que modifiquem a probabilidade da ocorrência de uma determinada causa de um modo de falha;
- informações que indiquem que a ocorrência é diferente da prevista no FMEA, ou quando existam modificações nos meios de prevenção desta causa;
- novas causas que é necessário incluir;
- modificações nos meios de detecção de uma determinada falha.

3.2. TIPOS DE FMEA

Segundo Stamatis (2003) *cit in* Fernandes (2005) existem diversos tipos de FMEA, dos quais se destacam:

a) FMEA de Sistema

O FMEA de Sistema, também denominado FMEA, tem por objectivo avaliar falhas em sistemas e subsistemas nas fases iniciais de definição do conceito e do projecto. O FMEA de Sistema tem por base a identificação das potenciais falhas do sistema em relação à execução das funcionalidades, procurando atender às necessidades e percepção dos clientes em relação ao sistema. *‘O FMEA de Sistema auxilia na selecção do sistema que melhor atende as necessidades do cliente e a determinar redundâncias no sistema, define uma base para procedimentos de diagnóstico de falhas e acima de tudo identifica falhas potenciais reduzindo o risco do sistema’* (Stamatis (2003) *cit in* Fernandes (2005)).

b) FMEA de Produto ou DFMEA (*Design Failure Mode and Effects Analysis*)

O FMEA de Produto tem por base avaliar as possíveis falhas em produtos antes da sua introdução no processo de fabrico, devendo no entanto o produto ser analisado durante toda a sua vida útil. Este tipo de FMEA focaliza-se na análise das falhas potenciais do projecto, em relação ao cumprimento dos objectivos definidos para cada uma das suas características, encontrando-se directamente ligado à capacidade do projecto em atender os objectivos definidos. *‘O FMEA de Projecto define necessidade de alterações no projecto, estabelece prioridades para as acções de melhoria no projecto, auxilia na definição de*

testes e validação do produto, na identificação de características críticas e significativas do produto e na avaliação dos requisitos e alternativas do projecto’’ (Stamatis (2003) cit in Fernandes (2005)).

c) FMEA de Processo ou PFMEA (*Process Failure Mode and Effects Analysis*)

O FMEA de Processo tem por base avaliar falhas em processos antes da introdução do produto para produção em série. Este tipo de FMEA centra-se na identificação das falhas potenciais do processo em relação ao cumprimento dos objectivos definidos para cada uma de suas características, encontrando-se directamente ligada à capacidade do processo em cumprir os objectivos definidos para o mesmo. *“O FMEA de processo define necessidade de alterações no processo, estabelece prioridades para as acções de melhoria, auxilia na execução do plano de controlo do processo e na análise dos processos de manufactura e montagem’’ (Stamatis (2003) cit in Fernandes (2005)).*

d) FMEA de Serviço

O FMEA de Serviço apresenta diversas aplicações, nomeadamente para execução de FMEA's específicos, para avaliar as etapas de desenvolvimento de um sistema, de forma semelhante a um produto.

As etapas de execução do FMEA de serviço são as seguintes:

- 1- Sistema de Serviço (FMEA de Sistema),
- 2- Produto do Serviço (FMEA de Produto)
- 3- Processo de execução do Serviço (FMEA de Processo).

No caso do FMEA de Serviço ser executado englobando todas as características desde o sistema de serviço até ao processo em si, então neste caso é usado para avaliar falhas nos serviços antes do seu início, mas, deve ser revisto enquanto os serviços estiverem activos.

O FMEA de Serviço evidencia as falhas do serviço face às necessidades do cliente e ao cumprimento dos objectivos definidos para cada uma das suas características e processos, e define a necessidade de alterações no serviço, estabelecendo também as prioridades para acções de melhoria.

3.3. FASES DE DESENVOLVIMENTO DO FMEA E FMECA

“As fases de desenvolvimento do FMEA são tipicamente as seguintes (Silva, Fonseca e Brito, 2006):

1. *análise e hierarquização do sistema;*
2. *selecção do sub-sistema a analisar;*
3. *estudo funcional e selecção de um estado de funcionamento;*
4. *identificação de um modo potencial de falha;*
5. *identificação dos efeitos possíveis do modo de falha;*
6. *identificação das respectivas causas;*
7. *identificação dos métodos de detecção e de prevenção.*

Para a realização de uma análise através do FMECA, é necessário proceder-se às seguintes fases adicionais (Silva, Fonseca e Brito, 2006):

8. *estimar a gravidade do modo de falha em estudo (S);*
9. *estimar a probabilidade de ocorrência do modo de falha (O);*
10. *estimar a probabilidade de detecção do modo de falha (D);*
11. *análise de criticidade.”*

De seguida é feita uma descrição das várias fases (Silva, Fonseca e Brito, 2006):

▪ **Análise e hierarquização do sistema**

Nesta fase de análise, deve proceder-se à identificação dos vários sub-sistemas e sua hierarquização, recorrendo-se a diagramas simples para representação do sistema de modo a realçar as funções essenciais do sistema.

Nesta primeira fase é fundamental definir o limite do sistema através da sua interacção com outros sistemas, definir o nível de análise que se pretende obter e definir critérios a utilizar.

▪ **Análise funcional**

Nesta fase, deve efectuar-se uma listagem de funções que o elemento em estudo vai desempenhar, tendo em atenção as exigências e expectativas do cliente, de forma a definir e implementar medidas preventivas.

▪ **Identificação dos modos potenciais de falha**

Após o conhecimento das funções, procede-se a um levantamento dos modos potenciais de falha, identificando a forma como se vão manifestar a(s) falha(s), colocando a questão: ‘‘ como pode falhar? ’’. O bom desenvolvimento desta fase, depende do grau de pormenorização com que se efectuaram as fases de divisão do sistema e a sua análise funcional.

Uma ajuda para se proceder à identificação das falhas, passa pela análise de casos de estudo documentados, experiências ou testes laboratoriais, experiências em campo ou à opinião de peritos especializados na área.

▪ **Efeitos dos modos potenciais de falha**

Nesta fase, para cada modo potencial de falha procede-se ao levantamento das suas consequências ou efeitos negativos, podendo a análise, ser efectuada de uma forma local (subsistema) ou global a nível de efeitos finais.

▪ **Causas dos modos potenciais de falha**

Esta é a fase em que se analisam as causas que poderiam ter estado na origem dos modos de falha potenciais, pois um modo de falha pode ter origem em várias causas. Nesta fase deve tentar responder-se à seguinte questão: ‘‘ para que a função se desempenhe favoravelmente, o que é que é necessário ocorrer? ’’

É importante referir-se que quanto mais grave são os efeitos dos modos de falha, mais rigorosa e desenvolvida deve ser a identificação das causas das falhas.

▪ **Métodos de detecção e prevenção**

Em cada modo de falha é importante perceber-se como é que estas são detectadas e com que meios se obtém essa detecção. O método de detecção também deve agir como um sistema que minimize a ocorrência dos modos de falha.

▪ **Estimar a gravidade do modo de falha em estudo - S**

O índice de severidade (S), permite avaliar a gravidade dos efeitos causados por um modo de falha sobre o sistema em análise.

- **Determinação da ocorrência – O**

O índice de ocorrência (*O*), define a frequência ou probabilidade com que pode ocorrer um determinado modo de falha e a respectiva causa.

- **Classificação da probabilidade de detecção - D**

O índice de detecção (*D*), é a probabilidade de detecção de um modo de falha, podendo ocorrer através de revisões de projecto, testes, medidas de controlo de qualidade, ou até mesmo pelo uso indevido do produto já por parte do utilizador.

- **Análise de criticidade**

A determinação quantitativa da criticidade consiste no cálculo do índice de risco de cada modo de falha (IR) também denominado criticidade (*C*), que é definido pela equação:

$$\text{FMECA} = \text{FMEA} + C \quad \text{onde,}$$

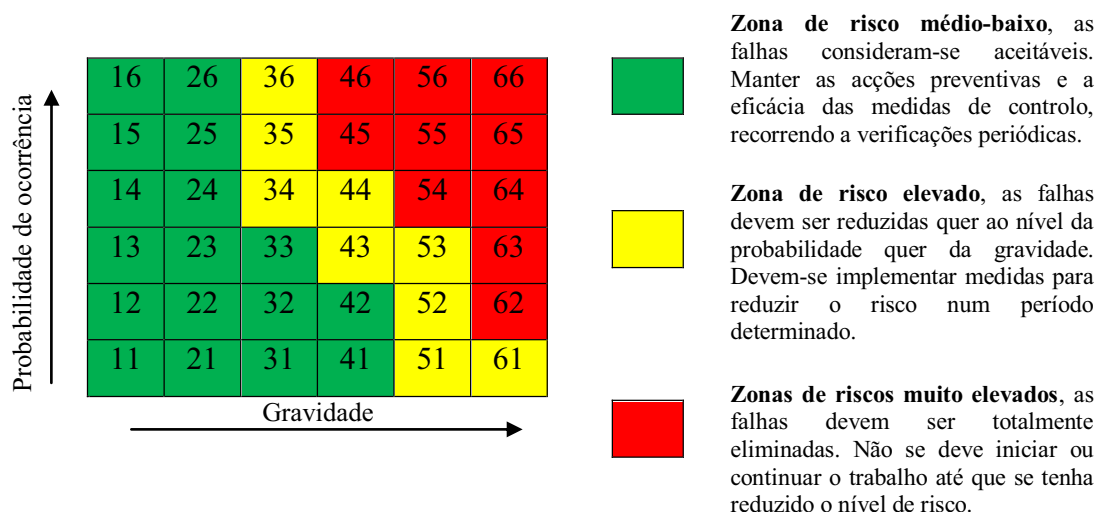
$$C = \text{IR} = (\text{Ocorrência}) \times (\text{Severidade}) \times (\text{Detecção})$$

Este índice também pode ser denominado por RPN (*Risk Priority Number* - Número de Prioridade de Risco).

3.4. DEFINIÇÃO DE ESCALAS DE FMECA PARA APLICAÇÃO AO CASO DE ESTUDO

Neste caso de estudo, a aplicação directa do FMECA não é o mais apropriado. Um dos problemas surgidos na sua aplicação deve-se às escalas relativas à probabilidade de ocorrência (O) e detecção (D), se basearem em valores probabilísticos. No caso em análise não existem estudos probabilísticos relativos a processos construtivos, dos quais se possam retirar os valores relativos às probabilidades de ocorrências, bem como à fiabilidade dos sistemas de detecção de falhas, necessários para aplicação das escalas que constam na bibliografia. Concluiu-se assim, pela necessidade de se recorrer a escalas modificadas de modo a conseguirem-se aplicar ao caso em estudo. Efectuou-se assim a aplicação do FMECA recorrendo-se à utilização apenas de escalas de gravidade (G) e de probabilidade de ocorrência (O), passando o índice de risco a definir-se através da associação deste dois dígitos (GO). Esta referência do risco permite a construção de um quadro de criticidade (Tabela 3.1), no qual a gravidade (Tabela 3.2) se encontra representada em abcissa e a probabilidade de ocorrência (Tabela 3.3) nas ordenadas.

Tabela 3.1 - Escala de índice de risco (Adaptado de Lluna (1997: 216) e de Roxo, (2003:200))



Desta forma, a **escala de índice de risco** varia num espectro de valores de 11 (correspondente ao risco mínimo) a 66 (correspondente ao risco máximo). A **escala de gravidade** estabelece seis níveis de classificação, numerados de 1 a 6, por ordem crescente de gravidade do risco. Estes níveis apresentam-se qualificados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Escala de gravidade (Adaptado de Lluna, (1997) e de Roxo, (2003:195 a 200))

Escala de gravidade (G)	
Danos muito superficiais que levam à interrupção do trabalho por um intervalo de tempo inferior a um dia de trabalho.	1
Danos superficiais, cortes, entalamento, irritação dos olhos, dor de cabeça, incomodidade e todas as restantes situações que são passíveis de causar lesões que levem à ausência do trabalhador por um período superior a 1 dia e inferior a 3 dias de trabalho (excluindo o dia do acidente ¹⁶).	2
Fracturas menores ¹⁷ , dermatoses, transtornos músculo-esqueléticos, incapacidades temporárias ¹⁸ . Lesões estas que levam à ausência do trabalhador por um período superior a 3 dias de trabalho (excluindo o dia do acidente ¹⁶).	3
Lesões graves ¹⁹ , que provoquem lesões e incapacidades permanentes ²⁰ . Lesões estas que levam à ausência do trabalhador por um período superior a 3 dias de trabalho (excluindo o dia do acidente ¹⁶).	4
Acidente mortal (um)	5
Mais do que uma morte	6

¹⁶ O dia do acidente não é contabilizado pois, todos os encargos desse dia de ocorrência são suportados pela entidade empregadora.

¹⁷ Consideram-se fracturas menores, as provocadas em dedos à excepção dos polegares ou dedos do pé (segundo **RIDDOR - Reporting of Injuries, Diseases and Dangerous Occurrences Regulations**, 1995, Reino Unido *cit. in* IGT, 2005).

¹⁸ Incapacidade temporária (10.^a Conferência Internacional dos Estatísticos do Trabalho retomada pela 16.^a conferência em 1998 *cit in* Miguel, A. (2004)) define-se por “*acidentes de que resulte para a vítima incapacidade de pelo menos, um dia completo (8 horas) além do dia em que ocorreu o acidente, quer se trate de dias durante os quais a vítima teria trabalhado, quer não. Neste último caso temos o que, vulgarmente, se designa por acidente com baixa ou incapacidade temporária absoluta*”

¹⁹ Lesões graves segundo **RIDDOR - Reporting of Injuries, Diseases and Dangerous Occurrences Regulations**, 1995, Reino Unido *cit. in* IGT, 2005: Qualquer fractura à excepção dos dedos, que não sejam os polegares ou os dedos do pé; amputação; deslocação do ombro, da anca, do joelho ou lesão da coluna vertebral; perda temporária ou permanente da visão; queimadura química, de metal quente ou algum ferimento penetrante na vista; queimaduras e outros ferimentos provocados pela corrente eléctrica que conduzam à inconsciência, à necessidade de reanimação ou exijam internamento hospitalar por mais de 24 horas; qualquer situação que conduza à hipotermia, à hipertermia, à inconsciência, que implique necessidade de reanimação ou que exija internamento hospitalar por mais de 24 horas; inconsciência causada por asfixia ou pela exposição a uma substância perigosa ou a um agente biológico; intoxicação aguda que requeira tratamento médico, ou determine a perda da consciência em resultado da absorção de alguma substância por inalação, por ingestão ou através da pele; intoxicação aguda, que requeira tratamento médico, provocada pela exposição a um agente biológico, suas toxinas ou a material infectado.

²⁰ Incapacidade permanente (10.^a Conferência Internacional dos Estatísticos do Trabalho retomada pela 16.^a conferência em 1998 *cit in* Miguel, A. (2004)) define-se por “*acidentes de que resulte para a vítima, com carácter permanente, deficiência física ou mental ou diminuição da capacidade de trabalho*”

A classificação atribuída ao nível 3 e 4 da escala de gravidade, como falhas causadoras de lesões que levam à ausência do trabalhador por um período superior a 3 dias de trabalho (excluindo o dia do acidente) baseou-se em que relativamente à comunicação de acidentes de trabalho a *“directiva-quadro 89/391/CEE (art.º 9º/1-c) e o Código do Trabalho (art.º 275º/3-j) referem o conceito de "ausência superior a três dias úteis". Na definição deste conceito as Estatísticas Europeias de Acidentes de Trabalho – EEAT²¹ apenas consideram dias inteiros de ausência ao trabalho, excluindo o dia do acidente. Consequentemente, "ausência superior a três dias" significa "pelo menos quatro dias", o que implica que apenas se incluem acidentes cujo regresso ao trabalho não se efectua antes do quinto dia após o dia do acidente”* (IGT, (2005)).

A **escala de probabilidade de ocorrência** estabelece seis níveis de classificação, numeradas de 1 a 6, em ordem crescente de probabilidade de ocorrência. Estes níveis apresentam-se qualificados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Escala de probabilidade de ocorrência (Adaptado de Lluna (1997); Roxo, (2003:195 a 200) e Rodrigues, (2008))

Escala de probabilidade de ocorrência (O)		
Muito improvável	Falha virtualmente impossível de ocorrer (1 num milhão)	1
Improvável	Falha muito pouco provável de ocorrer	2
Pouco provável	Falha pouco provável (ocasional) de acontecer mas é possível que ocorra	3
Provável	Falha perfeitamente possível que ocorra	4
Muito provável	Falha muito provável (quase certo) que ocorra	5
Certo	Falha que é certo que ocorra	6

²¹ “Estatísticas Europeias de Acidentes de Trabalho (EEAT), Metodologia”, EUROSTAT, 2001.

➤ Análise da Escala de índice de risco

Analisando a Tabela 3.1 verifica-se que na zona de risco elevado figuram quatro valores de índice de risco aos quais correspondem como consequência dos danos 1 morte (51, 52, 53), ou mesmo várias mortes (61). Apesar da elevadíssima gravidade das consequências nestes níveis de risco, a probabilidade da ocorrência da falha subjacente, varia desde muito improvável a pouco provável. Porém, o facto do dano poder ser a morte ou várias mortes, leva a considerar-se que estes níveis de risco se deveriam classificar na zona de risco muito elevado (Tabela 3.4) ou numa zona de risco intermédio, entre a de risco elevado e muito elevado (zona cor de laranja na Tabela 3.5). Neste caso levaria a uma redefinição dos níveis de risco como apresentado na Tabela 3.5. Apesar desta consideração optou-se por se manter o zonamento indicado na bibliografia consultada (Lluna, 1997: 216 e Roxo, 2003:200), para a avaliação de riscos de cada uma das operações em estudo, confrontando-se no teste da metodologia (Capítulo 5), o grupo de técnicos a consultar, no sentido deles se pronunciarem relativamente à aplicabilidade e eficácia de cada uma destas escalas de índices de riscos.

Tabela 3.4 - Escala de índice de risco modificada 1 (Adaptado de Lluna (1997: 216) e de Roxo, (2003:200))

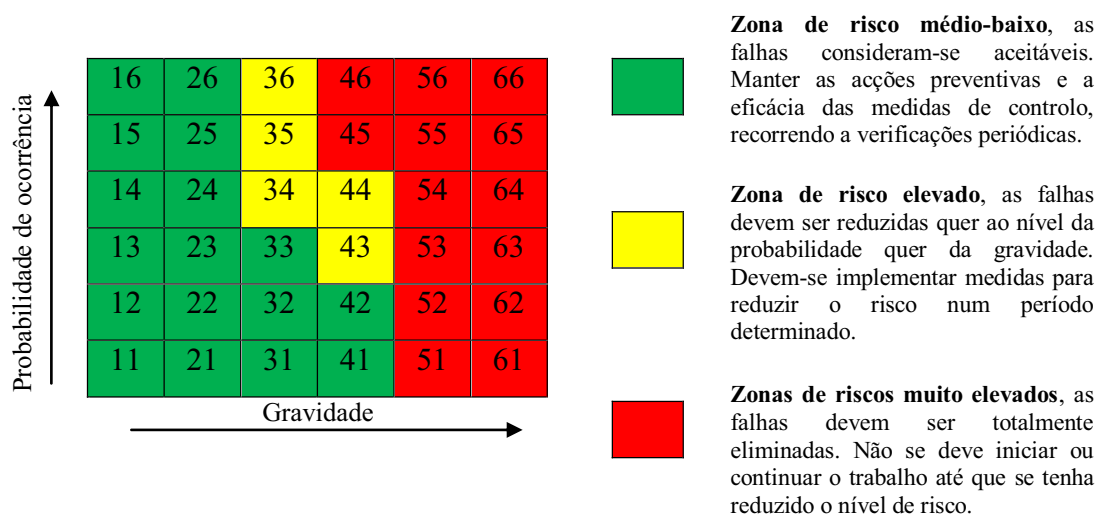
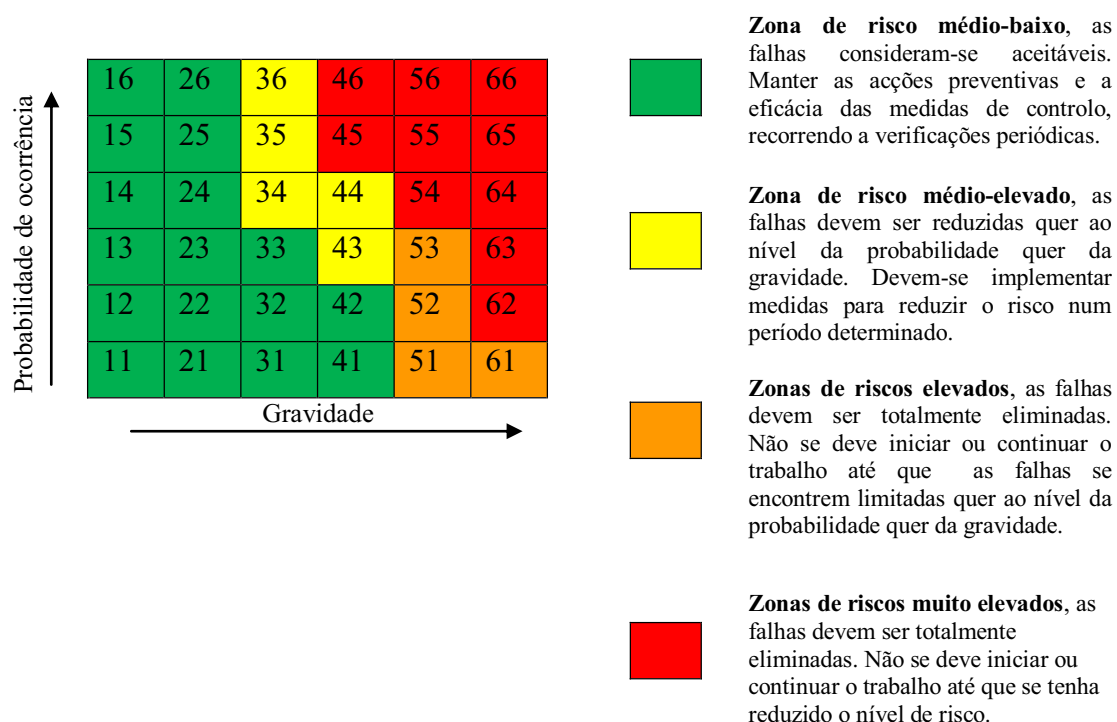


Tabela 3.5 - Escala de índice de risco modificada 2 (Adaptado de Lluna (1997: 216) e de Roxo, (2003:200))



No seguimento deste estudo é aplicado este método de análise de falhas – FMECA, aos sistemas de estabilidade e reforço de túneis, nomeadamente na aplicação de betão projectado reforçado com fibras metálicas, cambotas metálicas, pregagens tipo Swellex e pregagens activas com injeção de calda. Para aplicação do FMECA, foram construídas tabelas com a configuração básica, indicada na tabela 3.6

Tabela 3.6 – Configuração da estrutura das tabelas aplicadas no FMECA

Ações preventivas recomendadas	Indica as medidas que devem ser tomadas de modo a eliminar ou minimizar os riscos.
IR	Define-se através da associação de dois dígitos (gravidade e probabilidade de ocorrência), podendo variar num espectro de 11 (correspondente ao risco mínimo) a 66 (correspondente ao risco máximo), permitindo adoptar determinadas medidas para minimizar ou eliminar os riscos.
O	Indica a probabilidade de ocorrência do risco em análise, avaliada numa escala de 1 a 6.
G	Indica a gravidade do dano causado no trabalhador, pela exposição ao risco, avaliada numa escala de 1 a 6.
Efeitos / consequências	Indica quais as possíveis consequências ou efeitos causados por exposição aos riscos em análise.
Riscos	Indica quais os riscos associados as falhas ou perigos em análise.
Tipo de efeito	Indica se o efeito é directo ou indirecto, isto é, se for directo significa que os efeitos causados manifestam-se no instante em que ocorrem. Caso contrário se os efeitos apenas se manifestam a longo prazo então estamos perante um efeito indirecto.
Causa(s)	Indica as possíveis causas de ocorrência da falha em análise.
Modo de falha / Perigo	Indica as falhas que podem ocorrer em cada tarefa.
Tarefas	Indica as tarefas subjacentes à operação em estudo.
Operação	Indica a operação em estudo.

4. APLICAÇÃO DO FMECA

4.1. REFORÇO E ESTABILIZAÇÃO DE TÚNEIS COM RECURSO A BETÃO PROJECTADO REFORÇADO COM FIBRAS METÁLICAS

4.1.1. Processo construtivo

➤ **Mão-de-obra necessária**

- Encarregado/supervisor;
- manobreadores/motoristas;
- serventes;
- pedreiros;
- membro da fiscalização.

➤ **Equipamentos afectos à actividade**

- *robot* de projecção de betão;
- multifunções acoplado com plataforma de elevação de pessoas/materiais (ex: Manitou);
- auto-betoneira;
- compressor;
- gerador;
- ferramentas manuais.

➤ **Instrução de Trabalho**

A projecção de betão com adição de fibras, compreende fundamentalmente as seguintes fases:

▪ **Caracterização do betão projectado**

O betão a utilizar na projecção para consolidação e estabilização de maciços em túneis, é fabricado numa central de betão, com composição previamente aprovada. Neste processo são adicionadas fibras metálicas ao betão de forma a aumentar a resistência do mesmo.

- **Projectção de betão para estabilização de maciços em túneis**

O betão projectado é aplicado através de um equipamento denominado “*robot* de projecção” (Figura 4.1), usando o método de projecção por via húmida. Este equipamento projecta o betão com elevada pressão através de mangueiras ao longo do braço telescópico mecânico. Todos os movimentos executados pela máquina são comandados à distância pelo manobrador.

Relativamente ao betão, este é transportado por uma auto-betoneira, que efectua também o abastecimento directo do *robot* de projecção.

A projecção de betão é efectuada com já referido com recurso ao *robot*, sendo a aplicação efectuada a partir do solo, aumentando o risco de projecção de partículas, pois o manobrador fica exposto a um nível inferior ao da projecção.

Após aplicação, sempre que for verificada instabilidade do betão projectado (fissuras), procede-se à sua remoção com recurso a ferramentas manuais, utilizadas pelos trabalhadores que se encontram no equipamento de elevação e transporte de pessoas.



Figura 4.1 – Equipamento de projecção ‘robot’ (Picote II (A), 2009)

4.1.2. Equipamentos de protecção colectiva necessários

- Sistema de ventilação adequada às condições exigidas;
- iluminação adequada e devidamente colocada;
- sinalização da zona;
- delimitação de perímetros de segurança da área de trabalho;
- garantir que todos os equipamentos eléctricos se encontram ligados a quadros parciais com protecção diferencial de 30 mA;
- Definir e sinalizar correctamente vias distintas de circulação de pessoas e equipamentos.

4.1.3. Equipamentos de protecção individual necessários

➤ **Condutor da auto-betoneira e do multifunções:**

- botas de protecção com biqueira e palmilha de aço;
- capacete de protecção (a usar sempre que o condutor se encontrar fora do equipamento);
- colete reflector.

➤ **Manobrador do robot de projecção de betão:**

- botas de protecção com biqueira e palmilha de aço;
- capacete de protecção;
- colete reflector;
- protecção auditiva;
- máscara de protecção;
- óculos ou viseira de protecção;
- luvas de protecção química e mecânica;
- fato de protecção química.

➤ **Outros trabalhadores envolvidos no processo:**

- botas de protecção com biqueira e palmilha de aço;
- capacete de protecção;
- colete reflector;
- luvas de protecção química e mecânica;
- protecção auditiva;
- máscara de protecção;
- óculos ou viseira de protecção;
- fato de protecção química;
- arnês de segurança (apenas para os trabalhadores que se encontrem na cesta do Manitou).

4.1.4. Aplicação do FMECA

Tabela 4.1 – Aplicação do FMECA ao método de estabilização de maciços em túneis com recurso a betão projectado, reforçado com fibras metálicas.

Universidade de Aveiro			Departamento de Engenharia Civil		1/3						
APLICAÇÃO DO FMECA AO MÉTODO DE ESTABILIZAÇÃO DE MACIÇOS EM TÚNEIS COM RECURSO A BETÃO PROJECTADO (REFORÇADO COM FIBRAS METÁLICAS)											
Operação	Tarefas	Modo de falha / Perigos	Causa(s)	Tipo de efeito	Riscos	Efeitos/consequências	Gravidade (G)	P. Ocorrência (O)	Índice de Risco (IR)	Ações preventivas recomendadas	
Operação de projecção de betão por meios mecânicos para estabilização do maciço	Preparação do maciço e do local de trabalho para aplicação de betão projectado	Incorrecta preparação da superfície do maciço para projecção de betão	• Saneamento (escombramento) mal executado.	Efeitos directos	• Queda de Materiais;	• Danos materiais;	4	4	44	• Promover fiscalização e controlo de modo a efectuar-se um correcto e seguro escombramento do maciço;	
				Efeitos indirectos	• Instabilização do maciço; • Colapso da estrutura de estabilização.	• Danos pessoais (esmagamento, entalamento, morte).	5	3	53		
		Iluminação insuficiente, deficiente ou incorrectamente orientada no local de trabalho	• Falta de meios de iluminação; • Iluminação colocada de forma incorrecta; • Mau estado de conservação das luminárias.	Efeitos directos	• Erros de execução; • Projectção de betão contra os trabalhadores; • Encamamento dos trabalhadores;	• Danos materiais;	4	3	43	• Previsão de iluminação suficiente para a segurança dos trabalhadores e da obra;	
					• Riscos eléctricos; • Queda ao mesmo nível; • Colisão entre equipamentos rntos; • Colisão equipamento/trabalhador.		2	5	25	• Direcção dos meios de iluminação para as paredes de túnel de forma a evitar o encamamento dos trabalhadores;	
							2	4	24		
							4	3	43		
	Preparação do betão projectado	Características inadequadas do betão para o efeito	• Incorrecta densidade de fibras metálicas por m³ de betão.	Efeitos directos	• Queda de Materiais;	• Danos materiais;	4	4	44	• Fabrico do betão com as características exigidas; • Verificar se o tipo de betão que vai ser projectado está de acordo com as respectivas especificações técnicas;	
					Efeitos indirectos	• Instabilização do maciço; • Colapso da estrutura de estabilização.	• Danos pessoais (esmagamento, entalamento, soterramento, morte).	5	3	53	• Proceder a ensaio de carotes de betão projectado em laboratório;
		Alimentação do robot de projecção com betão	Incorrecta aproximação da auto-betoneira para alimentação da máquina de projecção de betão; Incorrecta orientação no manobra de aproximação de marcha-a-trás da auto-betoneira (inexistência de auxílio de manobra, inexistência de sinalização acústica de marcha-a-trás).	Efeitos directos	• Colisão equipamento/trabalhador.	• Danos materiais;	5	4	54	• Promover formação, informação e sensibilização aos mandobadores que executam esta tarefa;	
											• Delimitar um perímetro de segurança aquando da movimentação da auto-betoneira;
											• Escolha do equipamento de projecção de betão adequado ao trabalho;
											• Promover fiscalização de forma a verificar se os equipamentos usados são os adequados ao desempenho da tarefa;
Aplicação do betão projectado	Equipamento de execução inadequado	• Uso de um equipamento de projecção de betão que não é o mais indicado para o efeito; • Espessura de betão menor que a exigida.	Efeitos directos	• Queda de betão projectado;	• Danos materiais;	1	6	16	• Manutenção periódica dos equipamentos;		
				Efeitos indirectos	• Instabilização do maciço; • Colapso da estrutura de estabilização.	• Danos pessoais (esmagamento, entalamento, soterramento, morte).	5	3	53		
						6	2	62			

Universidade de Aveiro		Departamento de Engenharia Civil							2/3			
APLICAÇÃO DO FMECA AO MÉTODO DE ESTABILIZAÇÃO DE MACIÇOS EM TÚNEIS COM RECURSO A BETÃO PROJECTADO (REFORÇO COM FIBRAS METÁLICAS)												
Operação	Tarefas	Modo de falha / Perigos	Causa(s)	Tipo de efeito	Riscos	Efeitos/consequências	Gravidade (G)	P. Ocorrência (O)	Índice de Risco (IR)	Ações preventivas recomendadas		
Operação de projecção de betão por meios mecânicos para estabilização do maciço	Aplicação do betão projectado	Manobrador do equipamento mecânico do betão projectado não qualificado	<ul style="list-style-type: none">• Incorrecta orientação da projecção de betão;• Trabalhar com o braço da máquina na vertical;• Malha de fibras metálicas não distribuídas uniformemente;• Espessura de betão menor que a exigida;• Desrespeito das distâncias de segurança do manobrador.	Efeitos directos	<ul style="list-style-type: none">• Projecção de betão contra os trabalhadores;• Queda de materiais;	<ul style="list-style-type: none">• Danos materiais;• Danos pessoais (lesões oculares, atropelamento, esmagamento, soterramento, morte).	3	4	34	<ul style="list-style-type: none">• Promover formação, informação e sensibilização ao manobrador do equipamento mecânico de projecção de betão;• Promover fiscalização de forma a verificar se o manobrador do equipamento de projecção possui qualificação para desempenho da tarefa;		
							4	4	44			
				Efeitos indirectos	<ul style="list-style-type: none">• Instabilização do maciço;• Colapso da estrutura de estabilização.	<ul style="list-style-type: none">• Danos materiais;	5	3	53			
							6	2	62			
		Problemas associados à mangueira de condução do betão	<ul style="list-style-type: none">• Obstrução da mangueira;• Incorrecta conexão da mangueira.	Efeitos directos	<ul style="list-style-type: none">• Rebentamento da mangueira em carga;• Fuga e derrame de betão;• Efeito chicote da mangueira.	<ul style="list-style-type: none">• Danos materiais;• Danos pessoais (lesões oculares, corte, fracturas, morte).	4	3	43	<ul style="list-style-type: none">• Garantir o bom estado de conservação e manutenção das mangueiras hidráulicas e pneumáticas mediante a sua inspecção visual;• Verificação das conexões da mangueira de condução do betão;		
							3	4	34			
							4	4	44	<ul style="list-style-type: none">• Formação, informação e sensibilização ao manobrador do equipamento sobre o seu modo de funcionamento e perigos associados ao mesmo;		
				<ul style="list-style-type: none">• Mau estado de conservação das escadas manuais metálicas;• Incorrecta fixação ou colocação das escadas manuais metálicas;• Mau estado de manutenção ou inexistência de guarda-corpos na cesta de elevação;• Mau estado de conservação do plataforma horizontal da cesta de elevação;• Equipamento de elevação não adequado para pessoas.	<ul style="list-style-type: none">• Mau estado de conservação das escadas manuais metálicas;• Incorrecta fixação ou colocação das escadas manuais metálicas;• Mau estado de manutenção ou inexistência de guarda-corpos na cesta de elevação;• Mau estado de conservação do plataforma horizontal da cesta de elevação;	Efeitos directos	<ul style="list-style-type: none">• Queda em altura;• Queda de objectos;• Queda ao mesmo nível.	<ul style="list-style-type: none">• Danos pessoais (fracturas, escoriações, entalamento).	5	4	54	<ul style="list-style-type: none">• Escolha do equipamento de elevação adequado para trabalhos em altura e para elevação de pessoas;• Inspeção e manutenção periódica do equipamento de elevação;• Aquando da utilização de escadas manuais metálicas, garantir que estas são fixas nas suas extremidades, de forma a evitar oscilações e que se encontrem em bom estado de manutenção;
									3	5	35	<ul style="list-style-type: none">• Garantir que os trabalhadores que se encontram na plataforma suspensa possuem arneses de segurança fixo a um ponto independente do equipamento;• Garantir que os acessórios de elevação mantêm a identificação do fabricante e marcação CE;
									1	6	16	<ul style="list-style-type: none">• Garantir a correcta amarração da plataforma suspensa do equipamento de elevação de cargas e pessoas;
		<ul style="list-style-type: none">• Rotura dos elementos de sustentação da plataforma suspensa;• Incorrecta fixação/amarração da plataforma ao equipamento de elevação de cargas;• Incorrecta colocação das sapatas niveladoras da máquina aquando da movimentação de cargas;• Movimentações bruscas do equipamento em carga;• Excesso de carga;• Equipamento de elevação colocado em zona de maciço instável ou muito desnivelado;	<ul style="list-style-type: none">• Danos materiais;	Efeitos directos	<ul style="list-style-type: none">• Capotamento da máquina;• Projecção do manobrador e ocupantes.	<ul style="list-style-type: none">• Danos materiais;• Danos pessoais (esmagamento, fracturas, escoriações, morte).	4	3	43	<ul style="list-style-type: none">• Verificar visualmente a resistência oferecida pelo maciço e correcta estabilização e nivelamento dos equipamentos durante o desempenho das suas funções, de forma a evitar oscilações desnecessárias;• Garantir a correcta amarração da plataforma suspensa ao equipamento de elevação de cargas;• Quando o equipamento se encontrar em carga, evitar movimentações bruscas da ceta;• Proibida a permanência de trabalhadores nas zonas inferiores da plataforma suspensa;• Não exceder a capacidade de carga máxima do equipamento de elevação bem como o número máximo de pessoas na plataforma;		
							4	4	44			

Departamento de Engenharia Civil										3/3		
APLICAÇÃO DO FMECA AO MÉTODO DE ESTABILIZAÇÃO DE MACIÇOS EM TÚNEIS COM RECURSO A BETÃO PROJECTADO (REFORÇADO COM FIBRAS METÁLICAS)												
Universidade de Aveiro	Operação	Tarefas	Modo de falha / Perigos	Causa(s)	Tipo de efeito	Riscos	Efeitos/consequências	Gravidade (G)	P.Ocorrência (O)	Índice de Risco (IR)	Ações preventivas recomendadas	
Operação de projecção de betão por meios mecânicos para estabilização do maciço	Falta de aplicação de EPC's adequados à tarefa		Falta de sinalização da zona de trabalho;	Zonas de circulação de equipamentos mecânicos não definidas ou não sinalizadas.	Efeitos directos	Colisão entre equipamentos;	Danos materiais;	1	5	15	Promover fiscalização e controlo da correcta aplicação dos EPC's necessários;	
								5	4	54		
								1	6	16		
								5	4	54		
		Falta de uso de EPI's adequados à tarefa	Falta de uso de óculos ou viseiras de protecção;	Falta de uso de luvas de protecção química e mecânica;	Falta de uso de colete reflector, botas de biqueira e palmilha de aço e capacetes de protecção;	Efeitos indirectos	Projecção de betão contra os trabalhadores;	Danos pessoais: (Doenças pulmonares ou respiratória, lesões oculares, cortes, lesões a nível cutânea, perda da capacidade auditiva).	2	6	26	Promover formação, informação e sensibilização aos trabalhadores que executam esta operação;
									2	6	26	
									4	6	46	
									4	6	46	
									4	6	46	
									4	6	46	

4.1.5. Análise de dados

Após análise detalhada das tabelas de FMECA referente ao método de estabilização de maciços em túneis com recurso a betão projectado reforçado com fibras metálicas, foi possível elaborar-se o gráfico da Figura 4.2, Figura 4.3 e a Tabela 4.2 de forma a auxiliar a interpretação dos dados obtidos, que sintetizam os resultados do índice de risco, referente ao método em estudo.

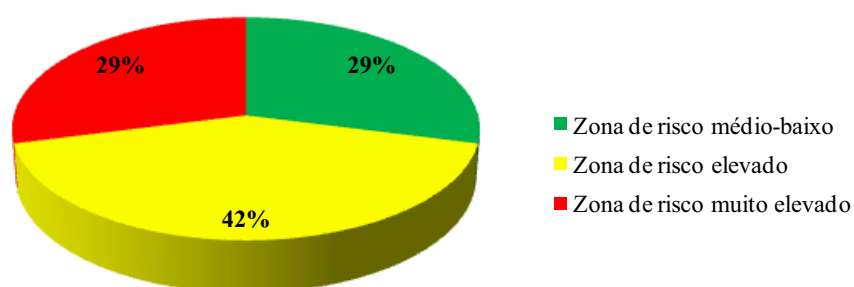


Figura 4.2 - Percentagens de valores referentes a cada zona de risco para o método de estabilização de maciços em túneis com recurso a betão projectado.

Tabela 4.2 - Análise de dados de valores máximo e mínimos de índice de risco referente a cada zona de risco, relativamente ao método de estabilização de maciços em túneis com recurso a betão projectado (reforçado com fibras metálicas).

	Zona de risco médio-baixo	Zona de risco elevado	Zona de risco muito elevado	TOTAL
Valor mínimo de índice de risco	15	34	46	15
Valor máximo de índice de risco	26	53	62	62

Analisando os resultados de acordo com a zona de risco em que se situam, pode-se concluir que os riscos associados à zona de risco elevado representam 42% da totalidade

dos riscos associados ao método em análise. No entanto, verifica-se que a zona de risco médio-baixo e muito elevado representam cada uma 29% dos riscos, associados ao método em análise.

Conclui-se assim que pelo facto da maior percentagem de riscos se encontrar na zona de risco elevado e muito elevado, significa que os riscos não são aceitáveis. Na zona de risco elevado 56% (Figura 4.3-b) são classificados, quanto à gravidade, como lesões graves cuja probabilidade de ocorrência é pouco provável ou provável. Este tipo de danos, a concretizarem-se, reflectem-se em índices de sinistralidade de frequência e gravidade elevados, o que provoca elevados prejuízos devido ao absentismo e consequentemente à baixa produtividade. No entanto, o facto de existir uma percentagem significativa de riscos na zona muito elevada, devido aos danos serem extremamente graves para o trabalhador, ter-se-á que actuar objectivamente na redução do nível de risco, através de medidas que reduzam a probabilidade da ocorrência, especialmente ao nível das causas que originam riscos com classificação 54 (45% - Figura 4.3-c) e 62 (37% Figura 4.3-c). Relativamente aos riscos classificados com o nível 46, dada a percentagem significativa que representam na operação (18% - Figura 4.6-c), como implicam lesões graves e a probabilidade da sua ocorrência é extremamente elevada, é primordial que se proceda à eliminação dos modos de falha que lhe estão subjacentes, especialmente actuando na diminuição da probabilidade da sua ocorrência. Na zona de risco muito elevado, podem ocorrer danos cujas consequências implicam perdas irremediáveis para os trabalhadores (lesões graves ou a morte), para a empresa e para a sociedade em geral.

O método apresenta índices de risco num espectro de valores entre 15 (valor mínimo) e 62 (valor máximo).

Referente à **zona de risco médio-baixo**, os valores variam entre 15 (valor mínimo) e 26 (valor máximo), onde predominam os valores de 15, 16 e 26. Estes valores indicam que apesar de existir uma elevada probabilidade de ocorrência, os danos provocados no trabalhador são de baixa gravidade. As falhas subjacentes a estes riscos consideram-se aceitáveis, no entanto devem manter-se as acções preventivas e a eficácia das medidas de controlo, recorrendo a verificações permanentes.

Quanto à **zona de risco elevado**, os valores variam entre 34 (valor mínimo) e 53 (valor máximo), onde predominam os valores de 43, 44 e 53, sendo o valor 44, o mais frequente (31%). Estes valores encontram-se num patamar intermédio entre a

probabilidade de ocorrência e a gravidade. Desta forma verifica-se que dentro desta zona de risco elevado, predominam riscos que são prováveis de acontecer e que implicam lesões graves podendo até provocar a morte do trabalhador (neste nível a falha considera-se pouco provável sendo possível a sua ocorrência). As falhas que proporcionam estes riscos devem ser reduzidas quer ao nível da probabilidade quer da gravidade. Devem ser implementadas medidas para reduzir o risco num período determinado.

Na **zona de risco muito elevado**, os valores variam entre 46 (valor mínimo) e 62 (valor máximo), onde predominam os valores de 54 e 62. Estes valores encontram-se num patamar de gravidade muito elevada e probabilidade de ocorrência média-baixa. Desta forma, verifica-se que dentro desta zona de risco muito elevado, predominam riscos prováveis de acontecer e que implicam uma ou várias mortes. As falhas que causam estes riscos devem ser totalmente eliminadas. Não se deve iniciar ou continuar o trabalho até que se tenha reduzido o nível de risco.

Verifica-se que na execução desta operação, a tarefa que apresenta índices de risco mais elevados é a aplicação do betão projectado e a que apresenta menores índices de risco é o processo de alimentação do robot de projecção com betão.

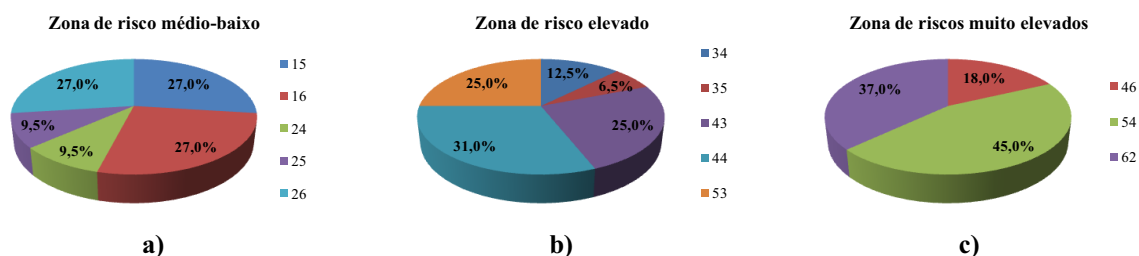


Figura 4.3 - Percentagens de cada um dos valores referentes a cada zona de risco para o método de estabilização de maciços em túneis com recurso a betão projectado.

4.2. REFORÇO E ESTABILIZAÇÃO DE TÚNEIS COM RECURSO A CMBOTAS METÁLICAS

4.2.1. Processo construtivo

➤ Mão-de-obra necessária

- Encarregado/supervisor;
- topógrafo;
- auxiliar de topografia;
- marleteiro;
- electricista;
- serralheiro;
- motoristas/ manobreadores;
- serventes;
- pedreiros;
- membro da fiscalização.

➤ Equipamentos afectos à actividade

- Giratória;
- multifunções acoplada com plataforma de elevação de pessoas/materiais (ex: Manitou);
- martelo de furação com brocas de diâmetro necessário;
- aparelho de soldar;
- equipamento de oxi-corte;
- camião grua;
- ferramentas manuais;
- escada manual metálica.

➤ Instrução de Trabalho

A montagem de perfilados metálicos (cambotas metálicas), compreende fundamentalmente as seguintes fases:

- **Carga/Transporte/Descarga**

Os perfilados metálicos encontram-se geralmente acondicionados no estaleiro industrial, pelo que a sua carga é efectuada com recurso a grua torre ou camião grua. Efectuada a carga, procede-se ao seu transporte para o local de aplicação através do camião grua e posterior descarga com o auxílio do equipamento como o multifunções ou giratória.

Durante o transporte deve ter-se em conta o acondicionamento do material e sua amarração, se tal for necessário.

- **Execução de sapatas**

As sapatas destinam-se a evitar que o pé da cambota penetre na soleira por acção das cargas verticais. Esta penetração nos hasteais da escavação provoca esforços na soleira, diminuindo a sua resistência à flexão possibilitando o seu empolamento.

Para tal é efectuada uma vala com o auxílio de giratória até à cota definida no projecto e colocados apoios nos pés de forma a aumentar a superfície de contacto, como se pode ver na Figura 4.4.

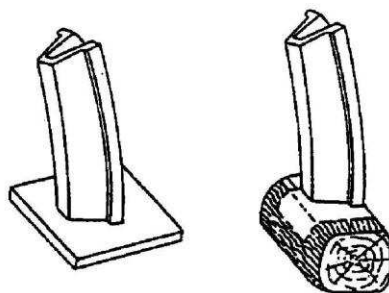


Figura 4.4 - Apoio dos pés direitos para aumentar a superfície de contacto (Picote II (B), 2009)

- **Furação da zona de apoio**

A furação da zona de apoio (hasteais e abóbada) é efectuada sempre que necessário com um martelo de furação. Esta furação é efectuada em zonas onde não existam pregagens tendo como finalidade a criação de pontos de amarração para posterior fixação dos perfilados metálicos.

A actividade é efectuada com o apoio de um multifunções com plataforma para a elevação de pessoas.

- **Montagem dos perfilados metálicos no solo**

Após a chegada dos perfilados à frente de trabalho, são descarregados e efectuada a união dos perfis no solo (um arco abóbada e dois pés direitos). A união é realizada com grampos metálicos, dos quais depende em grande parte o funcionamento do conjunto. Os elementos constituintes da cambota e sua fixação podem ser observados na Figura 4.5.

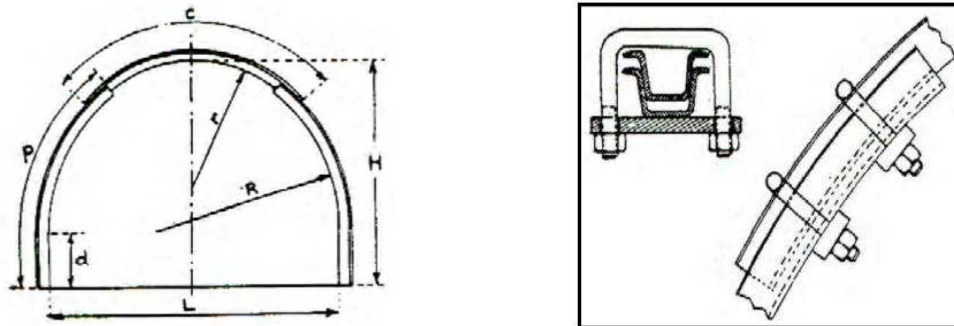


Figura 4.5 - Elementos constituintes de uma cambota e sua fixação (Picote II (B), 2009)

- **Elevação da cambota**

Concluída a união dos perfis, procede-se à elevação da cambota com o auxílio de um multifunções e/ou uma giratória. Nesta fase encontram-se trabalhadores na plataforma de elevação de pessoas de um multifunções, para que quando a cambota se encontrar na posição correcta, seja feita a sua fixação através da soldadura às pregagens existentes ou aos “mini pregos”, efectuados anteriormente.

Durante a realização desta actividade não se devem encontrar trabalhadores no raio de acção do equipamento nem do elemento metálico suspenso.

A cambota deve ficar na vertical, com as ligações entre as peças bem executadas, de maneira que o conjunto seja uma peça contínua e sólida.

- **Ligação entre cambotas**

As cambotas devem ficar ligadas entre si através de varões de aço soldados que servirão de travamento para evitar as deslocações entre si.

4.2.2. Equipamentos de protecção colectiva necessários

- Sistema de ventilação adequada às condições exigidas;
- iluminação adequada e devidamente colocada;

- sinalização da zona;
- delimitação de perímetros de segurança da área de trabalho;
- definir e sinalizar correctamente vias distintas de circulação de pessoas e equipamentos.

4.2.3. Equipamentos de protecção individual necessários

➤ **Condutor da giratória, do camião grua e do multifunções:**

- botas de protecção com biqueira e palmilha de aço;
- capacete de protecção (a usar sempre que o condutor se encontrar fora do equipamento);
- colete reflector.

➤ **Manobrador do martelo de furação:**

- botas de protecção com biqueira e palmilha de aço;
- capacete de protecção;
- colete reflector;
- protecção auditiva;
- máscara de protecção;
- óculos ou viseira de protecção;
- luvas de protecção mecânica.

➤ **Outros trabalhadores envolvidos no processo:**

- botas de protecção com biqueira e palmilha de aço;
- capacete de protecção e colete reflector;
- luvas de protecção mecânica;
- protecção auditiva;
- máscara de protecção;
- óculos ou viseira de protecção;
- arnês de segurança (apenas para os trabalhadores que se encontrem na cesta do Manitou).

4.2.4. Aplicação do FMECA

Tabela 4.3 – Aplicação do FMECA ao método de estabilização de maciços em túneis com recurso a cambotas metálicas.

Departamento de Engenharia Civil											1/3	
APLICAÇÃO DO FMECA AO MÉTODO DE ESTABILIZAÇÃO DE MACIÇOS EM TÚNEIS COM RECURSO A CAMBOTAS METÁLICAS												
Operação	Tarefas	Modo de falha / Perigo	Causa(s)	Tipo de efeito	Riscos	Efeitos / consequências	Gravidade (G)	P.Ocorrência (O)	Índice de Risco (IR)	Ações preventivas recomendadas		
Operação de estabilização do maciço recorrendo a cambotas metálicas	Preparação do maciço e do local de trabalho para aplicação das cambotas metálicas	Incorrecta preparação da superfície do maciço para aplicação das cambotas.	• Saneamento (escorramento) mal executado.	Efeitos directos	• Queda de Materiais;	• Danos materiais;	4	4	44	• Promover fiscalização e controlo de modo a efectuar-se um correcto e seguro escombramento do maciço;		
				Efeitos indirectos	• Instabilização do maciço; • Colapso da estrutura de estabilização.	• Danos pessoais (esmagamento, entalamento, morte).	5	3	53			
		Iluminação insuficiente, deficiente ou incorrectamente orientada no local de trabalho.	• Falta de meios de iluminação; • Iluminação colocada de forma incorrecta; • Mau estado de conservação das luminárias.	Efeitos directos	• Erros de execução; • Colisão contra objectos; • Encançamento dos trabalhadores; • Riscos eléctricos; • Queda ao mesmo nível;	• Danos materiais;	4	3	43		• Previsão de iluminação suficiente para a segurança dos trabalhadores e da obra;	
					• Colisão entre equipamentos; • Colisão equipamento/trabalhador.	• Danos pessoais: (lesões oculares, electrização, electrocussão, fracturas, esmagamentos, atropelamento).	2	4	24			
							2	6	43			• Direcção os meios de iluminação para as paredes de túnel de forma a evitar o encandecimento dos trabalhadores;
							1	5	15			
	Carga, transporte e descarga das cambotas metálicas	Incorrecta movimentação mecânica dos materiais.	• Uso de equipamentos de movimentação inadequados para o efeito; • mau estado de conservação dos equipamentos de fixação das cargas (ganchos sem patilhas de segurança, cabos, correntes ou cordas danificadas) e não certificadas; • Incorrecta estabilização e nivelamento das máquinas aquando da movimentação de cargas; • Cargas mal acondicionadas ou mal amarradas.	Efeitos directos	• Queda de Materiais;	• Danos materiais;	4	5	45	• Manutenção regular de todos os equipamentos de fixação das cargas (ganchos com patilhas de segurança e todo o material de elevação, como por exemplo cordas, correntes...devem encontrar-se devidamente fiscalizados e certificados); • Garantir a utilização de cordas guia para manobramento das cargas; • Correcta estabilização e nivelamento das máquinas aquando da movimentação de cargas; • As cargas devem encontrar-se devidamente acondicionadas e correctamente amarradas; • Garantir que durante a carga e descarga não se encontram trabalhadores no raio de acção dos equipamentos nem das cargas suspensas;		
					• Capotamento da máquina.	• Danos pessoais (esmagamento, entalamento, atropelamento).	4	3	43			
Zona de passagem dos equipamentos com as cambotas, não delimitada.		• Falta de sinalização das zonas de passagem dos equipamentos.	Efeitos directos	• Colisão entre equipamentos;	• Danos materiais;	2	5	25	• Delimitar e sinalizar correctamente a zona de passagem de todos os equipamentos e as zonas de movimentação de cargas, usando fitas sinalizadoras ou barreiras de sinalização;			
				• Colisão equipamento/trabalhador.	• Danos pessoais: (esmagamento, atropelamento, entalamento).	5	4	54		• Promover corredores de circulação de pessoas, delimitando e sinalizando correctamente essas passagens;		

Departamento de Engenharia Civil			2/3								
APLICAÇÃO DO FMECA AO MÉTODO DE ESTABILIZAÇÃO DE MACIÇOS EM TÚNEIS COM RECURSO A CÂMBOTAS METÁLICAS											
Operação	Tarefas	Modo de falha / Perigo	Causa(s)	Tipo de efeito	Riscos	Efeitos / consequências	Gravidade (G)	P.Ocorrência (O)	Índice de Risco (R)	Ações preventivas recomendadas	
Operação de estabilização do maciço recorrendo a câmbotas metálicas	Aplicação das câmbotas metálicas	Incorrecta execução e sinalização das sapatas das câmbotas metálicas.	Erros na concepção das sapatas (dimensões); Não sinalização da vala da sapata; Permanência de trabalhadores no raio de acção da máquina.	Efeitos directos	Queda ao mesmo nível;	Danos materiais;	1	6	16	<ul style="list-style-type: none">Manter os trabalhadores fora do raio de acção dos equipamentos;Garantir que após abertura da vala, a mesma se encontre devidamente sinalizada;	
				Efeitos indirectos	Instabilização do maciço;	Danos pessoais: (fracturas, escoriações, esmagamento, soterramento, morte).	5	3	53	<ul style="list-style-type: none">Verificar se as dimensões das sapatas estão de acordo com as respectivas especificações técnicas;	
					Colapso da estrutura de estabilização.		6	2	62		
			Utilização de sistemas de fixação inadequados ao tipo de câmbota metálica a aplicar ;	Efeitos directos	Queda de Material;	Danos materiais;	4	5	45	<ul style="list-style-type: none">Fornecer à frente de trabalho um plano de montagem e fixação de câmbotas metálicas, com as especificações de todos os equipamentos a aplicar;	
					Riscos eléctricos;		3	4	34		
					Incêndio;		4	4	44		
					Queda em altura;		5	4	54	<ul style="list-style-type: none">Promover formação, informação e sensibilização sobre a forma de montagem e fixação das câmbotas metálicas;	
					Projeção de partículas;		3	6	36		
			Número insuficiente de elementos de ligação e de travamento das câmbotas metálicas ;	Efeitos indirectos	Instabilização do maciço;	Danos pessoais: (corte, electrização, fracturas, escoriações, queimaduras, entalamento esmagamento, soterramento, morte).	5	3	53	<ul style="list-style-type: none">Garantir o correcto travamento e fixação das câmbotas metálicas às pregagens existentes ou a minigrampas;Garantir o travamento entre câmbotas através de varões de aço soldados de forma a evitar deslocações entre si;Verificar o estado de conservação do aparelho de soldar;Não colocar materiais inflamáveis ou explosivos perto dos locais onde se executam as soldaduras e corte de ferro;	
					Colapso da estrutura de estabilização.		6	2	62		
			Aplicação de câmbotas metálicas com dimensões incorrectas face às necessidades exigidas para a estabilização;	Efeitos directos	Queda de materiais;	Danos materiais;	4	4	44		
					Efeitos indirectos	Instabilização do maciço;	Danos pessoais: (fracturas, escoriações, entalamento esmagamento, soterramento, morte).	5	3	53	
						Colapso da estrutura de estabilização.		6	2	62	

Universidade de Aveiro		Departamento de Engenharia Civil					3/3					
APLICAÇÃO DO FMECA AO MÉTODO DE ESTABILIZAÇÃO DE MACIÇOS EM TÚNEIS COM RECURSO A CÂMBOTAS METÁLICAS												
Operação	Tarefas	Modo de falha / Perigo	Causa(s)	Tipo de efeito	Riscos	Efeitos / consequências	Gravidade (G)	P. Ocorrência (O)	Índice de Risco (IR)	Ações preventivas recomendadas		
Operação de estabilização do maciço recorrendo a câmbotas metálicas	Aplicação das câmbotas metálicas	Equipamento de elevação dos trabalhadores não adequado para o efeito ou com falta de manutenção.	<ul style="list-style-type: none">Mau estado de conservação das escadas manuais metálicas;Incorrecta fixação ou colocação das escadas manuais metálicas;Mau estado de manutenção ou inexistência de guarda-corpos na cesteira de elevação;Mau estado de conservação do equipamento de elevação;Equipamento de elevação não adequado para pessoas.	Efeitos directos	<ul style="list-style-type: none">Queda em altura;Queda de objectos;Queda ao mesmo nível.	<ul style="list-style-type: none">Danos pessoais: (fracturas, escoriações, entalamento).	5	4	54	<ul style="list-style-type: none">Escolha do equipamento de elevação adequado para trabalhos em altura e para elevação de pessoas;Inspeção e manutenção periódica do equipamento de elevação;Aquando da utilização de escadas manuais metálicas, garantir que estas são fixas nas suas extremidades, de forma a evitar oscilações e que se encontram em bom estado de manutenção;Garantir que os trabalhadores que se encontram na plataforma suspensa possuem antes de segurança fixo a um ponto independente do equipamento;Garantir que os acessórios de elevação mantêm a identificação do fabricante e marcação CE;Garantir a correcta amarração da plataforma suspensa do equipamento de elevação de cargas e pessoas;		
			<ul style="list-style-type: none">Retorna dos elementos de sustentação da plataforma suspensa;Incorrecta fixação/amarração da plataforma ao equipamento de elevação de cargas;Incorrecta colocação das sapatas niveladoras da máquina aquando da movimentação de cargas;Movimentações bruscas do equipamento em carga;Excesso de carga;Equipamento de elevação colocado em zona de maciço instável ou muito desnivelado.		<ul style="list-style-type: none">Capotamento da máquina;Projeção do manobrador e ocupantes.	<ul style="list-style-type: none">Danos materiais;Danos pessoais (esmagamento, entalamento, fracturas, escoriações, morte).	4	3	43	<ul style="list-style-type: none">Verificar visualmente a resistência oferecida pelo maciço e correcta estabilização e nivelamento dos equipamentos durante o desempenho das suas funções, de forma a evitar oscilações desnecessárias;Garantir a correcta amarração da plataforma suspensa ao equipamento de elevação de cargas;Quando o equipamento se encontrar em carga, evitar movimentações bruscas da cesteira;Proibida a permanência de trabalhadores nas zonas inferiores da plataforma suspensa;Não exceder a capacidade de carga máxima do equipamento de elevação bem como o número máximo de pessoas na plataforma;		
			<ul style="list-style-type: none">Falta de sinalização da zona de trabalho;Zonas de circulação de equipamentos mecânicos não definidas ou não sinalizadas.	Efeitos directos	<ul style="list-style-type: none">Colisão entre equipamento;Colisão equipamentos/trabalhadores;Queda ao mesmo nível;Queda em altura.	<ul style="list-style-type: none">Danos materiais;Danos pessoais: (atropelamento, entalamento, fracturas, escoriações, morte).	1	5	15	<ul style="list-style-type: none">Promover fiscalização e controlo da correcta aplicação dos EPC's necessários;Definir e sinalizar correctamente vias distintas de circulação de pessoas e equipamentos;Mantiver os trabalhadores fora do raio de acção dos equipamentos;Promover formação, informação e sensibilização aos trabalhadores que executam esta operação;		
		<ul style="list-style-type: none">Falta de aplicação de EPC's adequados à tarefa.					5	4	54			
							1	6	16			
									5	4	54	
				Efeitos directos	<ul style="list-style-type: none">Projeção de partículas contra os trabalhadores;	<ul style="list-style-type: none">Danos pessoais: (Doenças pulmonares ou respiratórias, lesões oculares, lesões a nível cutâneo, queimaduras, perda da capacidade auditiva).	3	6	36			
				Efeitos indirectos	<ul style="list-style-type: none">Exposição prolongada a empoeiramento e a gases de combustão (equipamentos);Exposição prolongada ao ruído provocado pelos equipamentos mecânicos.		4	6	46			
					<ul style="list-style-type: none">Falta de uso de máscara de protecção e auriculares.		4	6	46			

4.2.5. Análise de dados

Após análise detalhada das tabelas de FMECA referente ao método de estabilização de maciços em túneis com recurso a cambotas metálicas, foi possível elaborar-se o gráfico da Figura 4.6, Figura 4.7 e a Tabela 4.4 de forma a auxiliar a interpretação dos dados obtidos, que sintetizam os resultados do índice de risco, referente ao método em estudo.

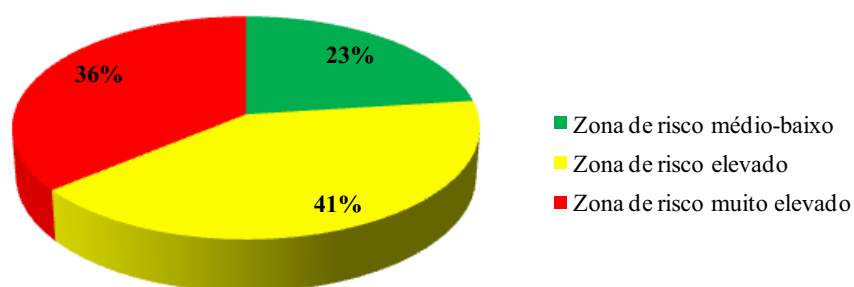


Figura 4.6 - Percentagens de valores referentes a cada zona de risco para o método de estabilização de maciços em túneis com recurso a cambotas metálicas.

Tabela 4.4 - Análise de dados de valores máximo e mínimos de índice de risco referente a cada zona de risco, relativamente ao método de estabilização de maciços em túneis com recurso a cambotas metálicas.

	Zona de risco médio-baixo	Zona de risco elevado	Zona de riscos muito elevados	TOTAL
Valor mínimo de índice de risco	15	35	45	15
Valor máximo de índice de risco	26	53	62	62

Analisando os resultados de acordo com a zona de risco em que se situam, pode-se concluir que os riscos associados à zona de risco elevado representam 41% da totalidade

dos riscos associados ao método em análise. No entanto, verifica-se que a zona de risco médio-baixo e muito elevados representam, respectivamente, 23% e 36% dos riscos, associados ao método em análise.

Conclui-se assim, que pelo facto da maior percentagem de riscos se encontrar na zona de risco elevado e muito elevado, significa que os riscos não são aceitáveis. Na zona de risco elevado, 50% (Figura 4.7-b) são classificados, quanto à gravidade, como lesões graves cuja probabilidade de ocorrência é pouco provável ou provável. Este tipo de danos, a concretizarem-se, reflectem-se em índices de sinistralidade de frequência e gravidade elevados, o que provoca elevados prejuízos devido ao absentismo e consequentemente à baixa produtividade. No entanto, o facto de existir uma percentagem significativa de riscos na zona muito elevada, devido aos danos serem extremamente graves para o trabalhador, ter-se-á que actuar objectivamente na redução do nível de risco, através de medidas que reduzam a probabilidade da ocorrência, especialmente ao nível das causas que originam riscos com classificação 54 (43% - Figura 4.7-c) e 62 (29% Figura 4.7-c). Relativamente aos riscos classificados com o nível 45 e 46, dada a percentagem significativa que representam na operação (28% - Figura 4.7-c), como implicam lesões graves e a probabilidade da sua ocorrência é extremamente elevada, é primordial que se proceda à eliminação dos modos de falha que lhe estão subjacentes, especialmente actuando na diminuição da probabilidade da sua ocorrência. Na zona de risco muito elevado, podem ocorrer danos cujas consequências implicam perdas irremediáveis para os trabalhadores (lesões graves ou a morte), para a empresa e para a sociedade em geral.

Observou-se que o método apresenta valores de índice de risco num espectro de valores entre 15 (valor mínimo) e 62 (valor máximo).

Referente à **zona de risco médio-baixo**, os valores variam entre 15 (valor mínimo) e 26 (valor máximo), onde predominam os valores de 15, 16 e 25. Estes valores indicam que apesar de existir uma elevada probabilidade de ocorrência, os danos provocados no trabalhador são de baixa gravidade. As falhas subjacentes a estes riscos consideram-se aceitáveis, no entanto devem manter-se as acções preventivas e a eficácia das medidas de controlo, recorrendo-se a verificações permanentes.

Quanto à **zona de risco elevado**, os valores variam entre 34 (valor mínimo) e 53 (valor máximo), onde predominam os valores de 43, 44 e 53, apresentando estes a mesma percentagem de 25%. Estes valores encontram-se num patamar intermédio entre a

probabilidade de ocorrência e a gravidade. Desta forma, verifica-se que dentro desta zona de risco elevado, predominam riscos que são prováveis de acontecer e que implicam lesões graves podendo até provocar morte para o trabalhador. As falhas subjacentes a estes riscos devem ser reduzidas quer ao nível da probabilidade quer da gravidade. Devem ser implementadas medidas para reduzir o risco num período determinado.

Na **zona de risco muito elevado**, os valores variam entre 45 (valor mínimo) e 62 (valor máximo), onde predominam os valores de 54 e 62. Estes valores encontram-se num patamar de gravidade muito elevada e probabilidade de ocorrência média-baixa. Desta forma, verifica-se que dentro desta zona de risco muito elevado, predominam riscos prováveis de acontecer e que implicam uma ou várias mortes. As falhas que causam estes riscos devem ser totalmente eliminadas. Não se deve iniciar ou continuar o trabalho até que se tenha reduzido o nível de risco.

Verifica-se que, na execução desta operação, a tarefa que apresenta índices de risco mais elevados é a aplicação das cambotas metálicas, e a que apresenta menores índices de risco é o processo de carga, transporte e descarga das cambotas metálicas.

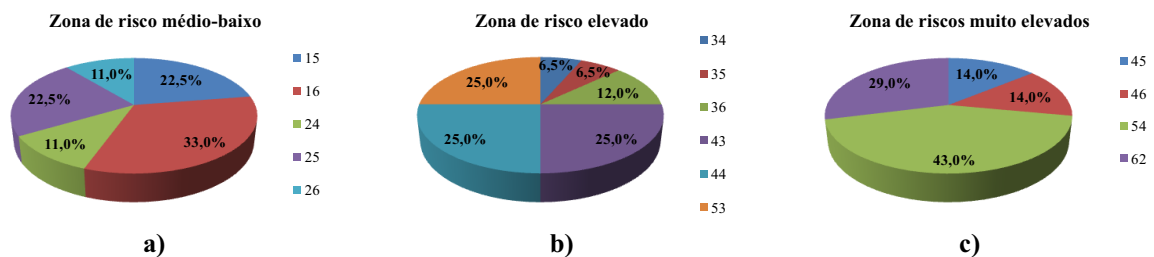


Figura 4.7 - Percentagens de cada um dos valores referentes a cada zona de risco para o método de estabilização de maciços em túneis com recurso a cambotas metálicas.

4.3. REFORÇO E ESTABILIZAÇÃO DE TÚNEIS COM RECURSO A PREGAGENS TIPO *SWELLEX*

4.3.1. Processo construtivo

➤ Mão-de-obra necessária

- Encarregado/supervisor;
- manobreadores/motorista;
- serventes;
- pedreiros.
- topógrafo;
- auxiliar de topografia;
- membro da fiscalização.

➤ Equipamentos afectos à actividade

- Equipamento de Perfuração “jumbo”;
- multifunções acoplado com plataforma de elevação de pessoas/materiais (ex: Manitou);
- compressor;
- bomba *Swellex*;
- gerador;
- ferramentas manuais;
- escada manual metálica.

➤ Instrução de Trabalho

A execução de pregagens do tipo *Swellex*, compreende fundamentalmente as fases que se descrevem de seguida.

▪ Furacão

A furação é efectuada pelo equipamento de furação “jumbo” (ver Figura 4.8). Esta actividade é realizada a partir do solo.

Independentemente do tipo de equipamento a utilizar e da zona de trabalho, durante a execução de furação, deve ser garantida a conformidade do ponto de furação, a inclinação

da pregagem / *Swellex*, a estabilidade do equipamento de furação e a resistência do maciço, no sentido de evitar oscilação excessiva do equipamento.

O equipamento deve ser manuseado por pessoas habilitadas para o efeito.



Figura 4.8 - Coluna de perfuração “Jumbo” (Picote II (A), 2009)

- **Aplicação das pregagens do tipo Swellex**

A pregagem tipo *Swellex* é provisória e consiste na introdução de um varão de secção tubular e na sua expansão contra a rocha. Este varão é encaixado no equipamento de instalação da *Swellex*, e após fixação é introduzido ar e água até o varão expandir ao máximo contra a rocha. Terminada esta tarefa é retirado o aparelho *Swellex*, sendo que a água sai através do orifício existente na vara.

Para a realização desta operação, é utilizado o multifunções com plataforma para elevação de pessoas ou plataforma elevatória devidamente certificada e dimensionada para o efeito e concebida para a elevação de pessoas.

O equipamento *Swellex* encontra-se dentro da plataforma elevatória.

4.3.2. Equipamentos de protecção colectiva necessários

- Sistema de ventilação adequada às condições exigidas;
- iluminação adequada e devidamente colocada;
- sinalização da zona;
- delimitação de perímetros de segurança da área de trabalho;

- definir e sinalizar correctamente vias distintas de circulação de pessoas e equipamentos.

4.3.3. Equipamentos de protecção individual necessários

➤ Condutor da multifunções:

- botas de protecção com biqueira e palmilha de aço;
- capacete de protecção (a usar sempre que o condutor se encontrar fora do equipamento);
- colete reflector;

➤ Manobrador do equipamento de furação “jumbo”:

- botas de protecção com biqueira e palmilha de aço;
- capacete de protecção;
- colete reflector;
- protecção auditiva;
- máscara de protecção;
- óculos ou viseira de protecção;
- luvas de protecção mecânica.

➤ Outros trabalhadores envolvidos no processo:

- botas de protecção com biqueira e palmilha de aço;
- capacete de protecção;
- Colete reflector;
- luvas de protecção mecânica;
- protecção auditiva;
- máscara de protecção;
- óculos ou viseira de protecção;
- arnês de segurança (apenas para os trabalhadores que se encontrem na cesta do Manitou).

4.3.1. Aplicação do FMECA

Tabela 4.5 – Aplicação do FMECA ao método de estabilização de maciços em túneis com recurso a pregagens tipo Swellex.

Departamento de Engenharia Civil										3/4	
APLICAÇÃO DO FMECA AO MÉTODO DE ESTABILIZAÇÃO DE MACIÇOS EM TÚNEIS COM RECURSO A PREGAGENS TIPO SWELLEX											
Operação	Tarefas	Modo de falha / Perigo	Causa(s)	Tipo de efeito	Riscos	Efeitos / consequências	Gravidade (G)	Ocorrência (O)	Índice de Risco (IR)	Ações preventivas recomendadas	
Operação de estabilização de maciços recorrendo a pregagens tipo Swellex	Preparação do maciço e do local de trabalho para aplicação das pregagens tipo Swellex	Incorrecta preparação da superfície do maciço para colocação das pregagens;	Saneamento (escoamento) mal executado.	Efeitos directos	• Queda de Materiais;	• Danos materiais;	4	4	44	• Promover fiscalização e controlo de modo a efectuar-se um correcto e seguro escoamento do maciço;	
				Efeitos indirectos	• Instabilização do maciço • Colapso da estrutura de estabilização.	• Danos pessoais (esmagamento, entalamento, morte).	5	3	53		
		Iluminação insuficiente, deficiente ou incorrectamente orientada no local de trabalho.	Falta de meios de iluminação;		• Erros de execução;	• Danos materiais;	4	3	43	• Previsão de iluminação suficiente para a segurança dos trabalhadores e da obra;	
				• projecção de materiais;	• Danos materiais;	2	5	25			
				• Encadeamento dos trabalhadores;	• Danos materiais;	2	4	24			
				• Riscos eléctricos;	• Danos pessoais: (lesões oculares, electrioção, electrocussão, fracturas, escoriações, esmagamento, atropelamento).	4	3	43			
	Mau estado de conservação das luminárias.	Uso de um equipamento de perfuração não apropriado;	Efeitos directos	• Queda ao mesmo nível;	• Danos pessoais: (lesões oculares, electrioção, electrocussão, fracturas, escoriações, esmagamento, atropelamento).	2	6	26	• Direcção dos meios de iluminação para as paredes de túnel de forma a evitar o encandeamento dos trabalhadores;		
				• Colisão entre equipamentos;	• Danos pessoais: (lesões oculares, electrioção, electrocussão, fracturas, escoriações, esmagamento, atropelamento).	1	5	15	• Garantir o bom estado de conservação dos cabos eléctricos e luminárias ;		
				• Colisão equipamento/trabalhador.	• Danos materiais;	5	4	54	• Utilização de equipamentos adequados para uma correcta aplicação das pregagens;		
	Aplicação das pregagens tipo Swellex	Equipamento de execução inadequado;	Mau estado dos equipamentos para execução das pregagens (equipamento de furação e equipamento de injeção de água);	Incorrecta adaptação da Swellex ao maciço.	Efeitos directos	• Queda de Materiais;	• Danos materiais;	4	4	44	• O equipamento de furação deve conter acessórios de recolha de poeira ou poeira húmida, de forma a reduzir o empoeiramento;
					• projecção de partículas;	• Danos pessoais: (fracturas, escoriações, esmagamento, perfuração, doenças respiratórias, atropelamento, morte).	3	6	36	• Manutenção e inspeção periódica de todos os equipamentos utilizados para a realização da tarefa;	
		Distâncias de segurança não verificadas;	Não delimitação da zona de segurança junto aos equipamentos.	Efeitos indirectos	• Empoeiramento;	• Danos pessoais: (fracturas, escoriações, esmagamento, perfuração, doenças respiratórias, atropelamento, morte).	4	6	46	• Previsão de corredores de circulação de pessoas distintas dos equipamentos;	
					• Instabilização do maciço; • Colapso da estrutura de estabilização.	• Danos pessoais: (atropelamento, entalamento, lesões oculares).	5	3	53	• Delimitação de perímetros de segurança relativamente à frente de perfuração e à colocação do equipamento;	
					• Colapso da estrutura de estabilização.	• Danos pessoais: (atropelamento, entalamento, lesões oculares).	6	2	62		
					• Queda de Materiais;	• Danos materiais;	4	4	44		
	Aplicação das pregagens tipo Swellex	Distâncias de segurança não verificadas;	Não delimitação da zona de segurança junto aos equipamentos.	Efeitos directos	• Colisão equipamento/trabalhador;	• Danos pessoais: (atropelamento, entalamento, lesões oculares).	5	4	54		
					• projecção de partículas.	• Danos pessoais: (atropelamento, entalamento, lesões oculares).	3	6	36		

Universidade de Aveiro		Departamento de Engenharia Civil				2/4					
APLICAÇÃO DO FMECA AO MÉTODO DE ESTABILIZAÇÃO DE MACIÇOS EM TÚNEIS COM RECURSO A PREGAGENS TIPO SWLLEX											
Operação	Tarefas	Modo de falha / Perigo	Causa(s)	Tipo de efeito	Riscos	Efeitos / consequências	Gravidade (G)	p.Ocorrência (O)	Índice de Risco (IR)	Ações preventivas recomendadas	
Operação de estabilização de maciços recorrendo a pregagens tipo Swllex	Aplicação das pregagens tipo Swllex	Incorrecta estabilização e nivelamento das máquinas (plataforma elevatória tipo "Manitou") aquando da movimentação de cargas;	<ul style="list-style-type: none">• Rotura dos elementos de sustentação da plataforma suspensa;	Efeitos directos	<ul style="list-style-type: none">• Capotamento da máquina;	<ul style="list-style-type: none">• Danos materiais;	4	3	43	<ul style="list-style-type: none">• Verificar visualmente a resistência oferecida pelo maciço e correcta estabilização e nivelamento dos equipamentos durante o desempenho das suas funções, de forma a evitar oscilações desnecessárias;• Garantir a correcta amarração da plataforma suspensa ao equipamento de elevação de cargas;• Quando o equipamento se encontrar em carga, evitar movimentações bruscas da cesta;• Proibida a permanência de trabalhadores nas zonas inferiores da plataforma suspensa;• Não exceder a capacidade de carga máxima do equipamento de elevação bem como o número máximo de pessoas na plataforma;	
			<ul style="list-style-type: none">• Incorrecta fixação/amarração da plataforma ao equipamento de elevação de cargas;								
			<ul style="list-style-type: none">• Incorrecta colocação das sapatas niveladoras da máquina aquando da movimentação de cargas;								
			<ul style="list-style-type: none">• Movimentações bruscas do equipamento em carga;								
		Equipamento de elevação dos trabalhadores não adequado para o efeito ou com falta de manutenção;	<ul style="list-style-type: none">• Excesso de carga;• Equipamento de elevação colocado em zona de maciço instável ou muito desnivelado;• Mau estado de conservação das escadas manuais metálicas;• Incorrecta fixação ou colocação das escadas manuais metálicas;• Mau estado de manutenção ou inexistência de guarda-corpos na cesta de elevação;• Mau estado de conservação do plataforma horizontal da cesta de elevação;• Equipamento de elevação não adequado para pessoas.	Efeitos directos	<ul style="list-style-type: none">• Queda em altura;• Queda de objectos;	<ul style="list-style-type: none">• Danos pessoais: (fracturas, escoriações, entalamento).	5	4	54	<ul style="list-style-type: none">• Escolha do equipamento de elevação adequado para trabalhos em altura e para elevação de pessoas;• Inspeção e manutenção periódica do equipamento de elevação;• Aquando da utilização de escadas manuais metálicas, garantir que estas são fixas nas suas extremidades, de forma a evitar oscilações e que se encontram em bom estado de manutenção;• Garantir que os trabalhadores que se encontram na plataforma suspensa possuem arneses de segurança fixos a um ponto independente do equipamento;• Garantir que os acessórios de elevação mantêm a identificação do fabricante e marcação CE;• Garantir a correcta amarração da plataforma suspensa do equipamento de elevação de cargas e pessoas;	
Problemas associados à mangueira de condução de água;	Efeitos directos	<ul style="list-style-type: none">• Obstrução da mangueira;• Incorrecta conexão da mangueira.	<ul style="list-style-type: none">• Rebentamento da mangueira em carga;• Fuga de água sob pressão;• Efeito chicote da mangueira.	<ul style="list-style-type: none">• Danos materiais;• Danos pessoais (lesões oculares, corte, fracturas, morte).	4	3	43	34	44	<ul style="list-style-type: none">• Garantir o bom estado de conservação e manutenção das manguieiras hidráulicas e pneumáticas mediante a sua inspeção visual;• Verificação das conexões da mangueira de condução de água;• Formação, informação e sensibilização dos manobreadores dos equipamentos sobre o seu modo de funcionamento e perigos associados aos mesmos;	

Departamento de Engenharia Civil		3/4								
APLICAÇÃO DO FMECA AO MÉTODO DE ESTABILIZAÇÃO DE MACIÇOS EM TÚNEIS COM RECURSO A PREGAGENS TIPO SWELEX										
Operação	Tarefas	Modo de falha / Perigo	Causa(s)	Tipo de efeito	Riscos	Efeitos / consequências	Gravidade (G)	P.Ocorrência (O)	Índice de Risco (IR)	Ações preventivas recomendadas
Operação de estabilização de maciços recorrendo a pregagens tipo Swellex	Aplicação das pregagens tipo Swellex	Erros na execução das pregagens;	• Incorrecta orientação das pregagens nas diálases;	Efeitos directos	• Queda de Materiais;	• Danos materiais;	4	4	44	• Colocação das pregagens sempre na perpendicular às diálases e nunca no sentido da diálase nem dentro da mesma; • Verificar se a pressão de água aplicada na Swellex é a necessária; • Promover formação, informação e sensibilização sobre a forma de execução das pregagens tipo Swellex.;
			• Incorrectas dimensões do furo para colocação da pregagem (Incorrecta adaptação da Swellex ao maciço);							
			• Insuficiente pressão de água aplicada na Swellex.							
			Efeitos indirectos	• Instabilização do maciço; • Colapso da estrutura de estabilização.	• Danos pessoais: (fracturas, escoriações, esmagamento, entalamento, soterramento, morte).	5	3	53	• Escolha de trabalhadores especializados para a realização da tarefa; • Supervisão e fiscalização aquando da realização da tarefa;	
		Aplicação de pregagens com dimensões incorrectas face às necessidades exigidas para a estabilização (diâmetro e comprimento do varão);	Efeitos directos	• Queda de Materiais;	• Danos materiais;	4	4	44	• Verificação das dimensões e da quantidade de pregagens necessárias para uma correcta e segura estabilização do maciço; • As estruturas geológicas (falhas, filões, diálases relevantes), assim como as ressurgências de água que forem assinaladas nas fichas de cartografia geológica e nas plantas deverão ser objecto de levantamento topográfico de promenor;	
		Incorrecta aplicação das pregagens face às necessidades exigidas para estabilização do maciço;	Efeitos indirectos	• Instabilização do maciço; • Colapso da estrutura de estabilização.	• Danos pessoais: (fracturas, escoriações, entalamento esmagamento, soterramento, morte).	5	3	53	• Promover formação, informação e sensibilização sobre a forma de execução das pregagens tipo Swellex.;	
Falta de aplicação de EPC's adequados à tarefa;	Falta de sinalização da zona de trabalho;	Efeitos directos	• Colisão entre equipamentos; • Colisão equipamentos/trabalhadores; • Queda ao mesmo nível; • Queda em altura.	• Danos materiais; • Danos pessoais: (atropelamento, entalamento, fracturas, escoriações, morte).	1	5	15	• Promover fiscalização e controlo da correcta aplicação dos EPC's necessários; • Definir e sinalizar correctamente vias distintas, de circulação de pessoas e equipamentos;		
						5	4	54	• Manter os trabalhadores fora do raio de acção dos equipamentos;	

Universidade de Aveiro		Departamento de Engenharia Civil							4/4	
APLICAÇÃO DO FMECA AO MÉTODO DE ESTABILIZAÇÃO DE MACIÇOS EM TÚNEIS COM RECURSO A PREGAGENS TIPO SWELLEX										
Operação	Tarefas	Modo de falha / Perigo	Causa(s)	Tipo de efeito	Riscos	Efeitos / consequências	Gravidade (G)	P.Ocorrência (O)	Índice de Risco (IR)	Ações preventivas recomendadas
Operação de estabilização de maciços recorrendo a pregagens tipo Swellex	Aplicação das pregagens tipo Swellex	Falta de uso de EPI's adequados à tarefa.	<ul style="list-style-type: none">Falta de uso de óculos ou viseiras de protecção;Falta de uso de luvas de protecção mecânica;Falta de uso de colete reflector, botas de biqueira e palmilha de aço e capacete de protecção;	Efeitos directos	<ul style="list-style-type: none">Projectção de água contra os trabalhadores;	<ul style="list-style-type: none">Danos pessoais: (Doenças pulmonares ou respiratória, lesões oculares, cortes, perda da capacidade auditiva).	2	6	26	<ul style="list-style-type: none">Promover formação, informação e sensibilização aos trabalhadores que executam esta tarefa;Monitorização da qualidade do ar interior nos túneis e do sistema de ventilação dos mesmos;Minimizar a libertação de gases por parte dos equipamentos de combustão, recorrendo aplicação de catalisadores;Promover fiscalização e controlo dos trabalhadores para o uso correcto dos EPI's necessários - (fato de protecção, botas de protecção com biqueiras e palmilha de aço, colete, luvas, capacete, viseira, máscara, óculos e protecção auricular);Verificar que os trabalhadores afectos à furação utilizam roupa justa ao corpo, para que esta não se prenda no equipamento de furação.
			Falta de uso de máscara de protecção e auriculares.	Efeitos indirectos	<ul style="list-style-type: none">Exposição prolongada ao ruído provocado pelos equipamentos mecânicos.				46	
									4	6

4.3.2. Análise de dados

Após análise detalhada das tabelas de FMECA referente ao método de estabilização de maciços em túneis com recurso a pregagens tipo *Swellex*, foi possível elaborar-se o gráfico da Figura 4.9 e Figura 4.10 e a Tabela 4.6 de forma a auxiliar a interpretação dos dados obtidos, que sintetizam os resultados do índice de risco, referente ao método em estudo.

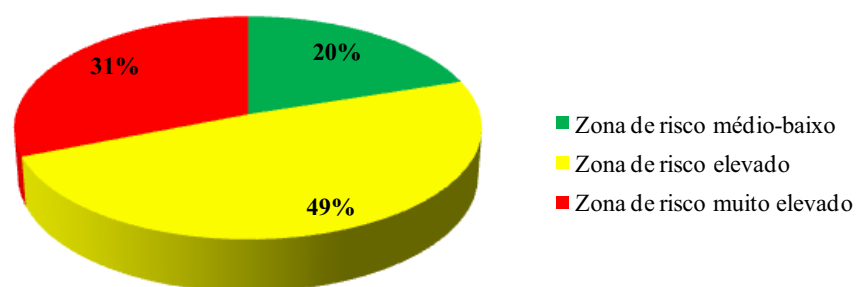


Figura 4.9 - Percentagens de valores referentes a cada zona de risco para o método de estabilização de maciços em túneis com recurso a pregagens tipo *Swellex*.

Tabela 4.6 - Análise de dados de valores máximo e mínimos de índice de risco referente a cada zona de risco, relativamente ao método de estabilização de maciços em túneis com recurso a pregagens tipo *Swellex*.

	Zona de risco médio-baixo	Zona de risco elevado	Zona de riscos muito elevados	TOTAL
Valor mínimo de índice de risco	15	35	46	15
Valor máximo de índice de risco	26	53	62	62

Analisando os resultados de acordo com a zona de risco em que se situam, pode-se concluir que os riscos associados à zona de risco elevado representam 49% da totalidade dos riscos associados ao método em análise. No entanto, verifica-se que a zona de risco

médio-baixo e muito elevados representam, respectivamente, 20% e 31% dos riscos, associados ao método em análise.

Conclui-se assim, que pelo facto da maior percentagem de riscos se encontrar na zona de risco elevado e muito elevado, significa que os riscos não são aceitáveis. Na zona de risco elevado 58% (Figura 4.10-b) são classificados, quanto à gravidade, como lesões graves cuja probabilidade de ocorrência é pouco provável ou provável. Este tipo de danos, a concretizarem-se, reflectem-se em índices de sinistralidade de frequência e gravidade elevados, o que provoca elevados prejuízos devido ao absentismo e consequentemente à baixa, produtividade. No entanto, o facto de existir uma percentagem significativa de riscos na zona muito elevada, devido aos danos serem extremamente graves para o trabalhador, ter-se-á que actuar objectivamente na redução do nível de risco, através de medidas que reduzam a probabilidade da ocorrência, especialmente ao nível das causas que originam riscos com classificação 54 (42% - Figura 4.10-c) e 62 (33% Figura 4.10-c). Relativamente aos riscos classificados com o nível 46, dada a percentagem significativa que representam na operação (25% - Figura 4.10-c), como implicam lesões graves e a probabilidade da sua ocorrência é extremamente elevada, é primordial que se proceda à eliminação dos modos de falha que lhe estão subjacentes, especialmente actuando na diminuição da probabilidade da sua ocorrência. Na zona de risco muito elevado, podem ocorrer danos cujas consequências implicam perdas irremediáveis para os trabalhadores (lesões graves ou a morte), para a empresa e para a sociedade em geral.

O método apresenta valores de índice de risco num espectro de valores entre 15 (valor mínimo) e 62 (valor máximo).

Referente à **zona de risco médio-baixo**, os valores variam entre 15 (valor mínimo) e 26 (valor máximo), onde predominam os valores de 15, 16 e 26. Estes valores indicam que apesar de existir uma elevada probabilidade de ocorrência, os danos provocados no trabalhador são de baixa gravidade. As falhas subjacentes a estes riscos consideram-se aceitáveis. No entanto, devem manter-se as acções preventivas e a eficácia das medidas de controlo, recorrendo-se a verificações permanentes.

Quanto à **zona de risco elevado**, os valores variam entre 34 (valor mínimo) e 53 (valor máximo), onde predominam os valores de 43, 44 e 53, sendo 44 (37% - Figura 4.10-c) o valor mais frequente. Estes valores encontram-se num patamar intermédio entre a

probabilidade de ocorrência e a gravidade. Desta forma verifica-se que dentro desta zona de risco elevado, predominam riscos que são prováveis de acontecer e que implicam lesões graves podendo até provocar morte para o trabalhador. As falhas que causam estes riscos devem ser reduzidas quer ao nível da probabilidade quer da gravidade. Devem ser implementadas medidas para reduzir o risco num período determinado.

Na **zona de risco muito elevado**, os valores variam entre 46 (valor mínimo) e 62 (valor máximo), onde predominam os valores de 54 e 62. Estes valores encontram-se num patamar de gravidade muito elevada e probabilidade de ocorrência média-baixa. Desta forma, verifica-se que dentro desta zona de risco muito elevado, predominam riscos prováveis de acontecer e que implicam uma ou várias mortes. As falhas subjacentes a estes riscos devem ser totalmente eliminadas. Não se deve iniciar ou continuar o trabalho até que se tenha reduzido o nível de risco.

Verifica-se que na execução desta operação, a tarefa que apresenta índices de risco mais elevados é a aplicação das pregagens tipo *Swellex*, e a que apresenta menores índices de risco é o processo de preparação do maciço e do local de trabalho para aplicação das pregagens tipo *Swellex*.

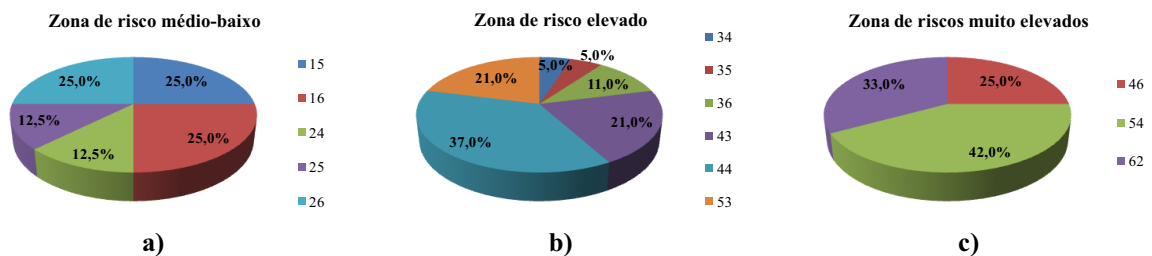


Figura 4.10 - Percentagens de cada um dos valores referentes a cada zona de risco para o método de estabilização de maciços em túneis com recurso a pregagens tipo *Swellex*.

4.4. REFORÇO E ESTABILIZAÇÃO DE TÚNEIS COM RECURSO A PREGAGENS COM INJECCÃO DE CALDA

4.4.1. Processo construtivo

➤ Mão-de-obra necessária

- Encarregado/supervisor;
- manobreadores/motorista;
- serventes;
- pedreiros;
- topógrafo;
- auxiliar de topografia;
- membro da fiscalização.

➤ Equipamentos afectos à actividade

- Equipamento de Perfuração “jumbo”;
- multifunções acoplado com plataforma de elevação de pessoas/materiais (ex: Manitou);
- central de injeccão de calda;
- compressor;
- gerador;
- equipamento de pré-esforço;
- ferramentas manuais;
- equipamento de injeccão de caldas;
- escada manual metálica;

➤ Instrução de Trabalho

A execução de pregagens com injeccão de calda compreende fundamentalmente as seguintes fases:

▪ Furação

A furação é efectuada pelo equipamento de furação “jumbo” (ver Figura 4.8). Esta actividade é realizada a partir do solo.

Independentemente do tipo de equipamento a utilizar e da zona de trabalho, durante a execução da furação, deve ser garantida a conformidade do ponto de furação, inclinação da pregagem, a estabilidade do equipamento de furação e a resistência do maciço, no sentido de evitar oscilação excessiva do equipamento.

O equipamento deve ser manuseado por pessoal habilitado para o efeito.

▪ Aplicação das pregagens

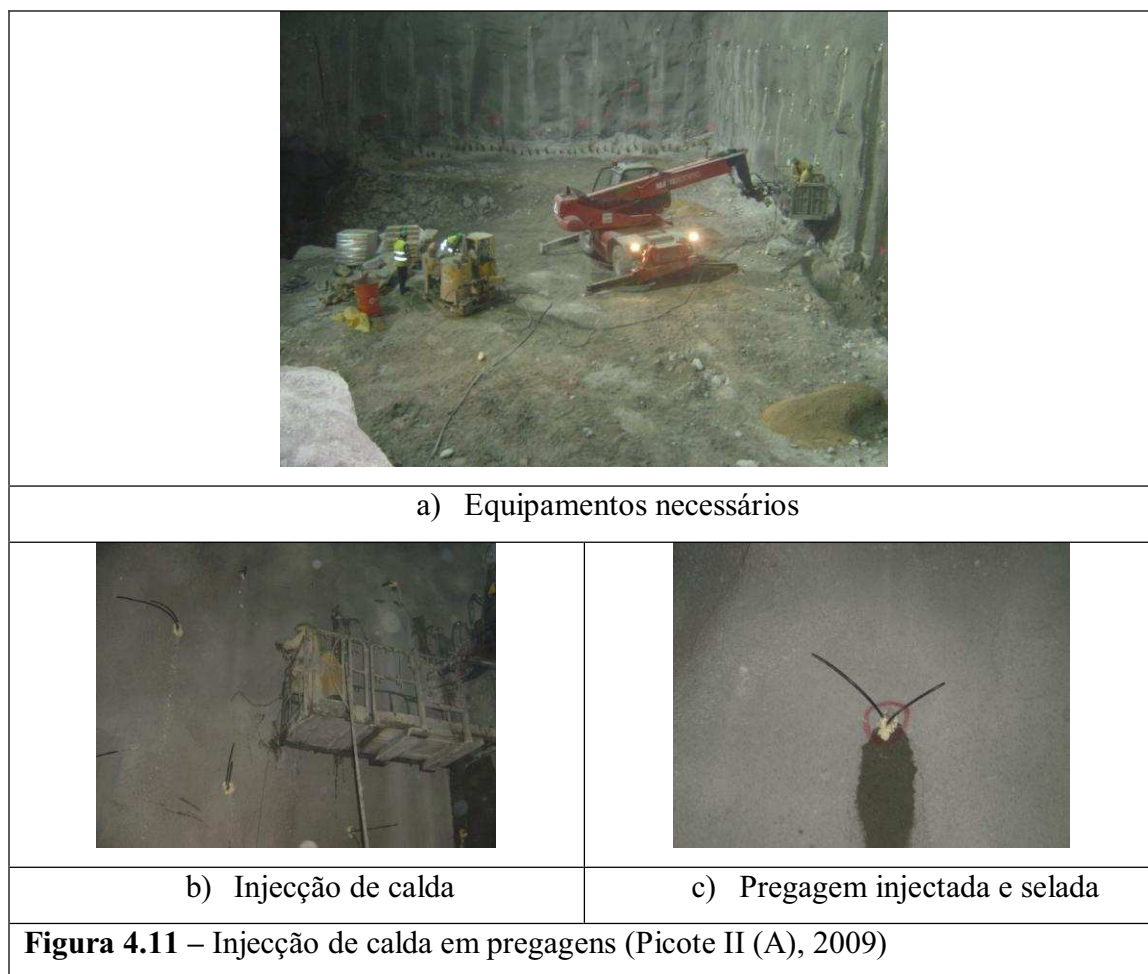
Após conclusão do furo e da sua adequada limpeza, é introduzido o varão de aço previsto no projecto de execução, incluindo os respectivos tubos para a injeção da calda.

Esta calda é preparada e injectada com o equipamento respectivo (central de injeção) por intermédio de mangueiras.

Esta operação pode, ser realizada com o auxílio de escada manual metálica, multifunções com plataforma para elevação de pessoas ou a partir de plataforma elevatória devidamente certificada e dimensionada para o efeito e preparada para a elevação de pessoas, sempre que as cotas dos furos assim o solicitem.

▪ Injecção de selagem de pregagens

Após conclusão do furo e a sua adequada limpeza, é introduzida a pregagem com um tubo condutor de calda de selagem até ao fundo do furo e a respectiva purga, selando o furo com espuma de poliuretano de modo a que a calda não seja derramada do interior do furo. Em seguida é aplicada uma calda de cimento no sentido ascendente, através do injector, até ao preenchimento total do furo. Na extremidade da pregagem encontra-se o tubo de purga, que permite verificar se o furo se encontra totalmente preenchido com calda. O processo fica concluído quando o tubo de purga, inicia um derrame contínuo de calda, permitindo ao operador certificar-se que não existem vazios no preenchimento da calda. A Figura 4.11 mostra algumas sequências desta aplicação.



▪ Aplicação do pré-esforço das pregagens

Após a obtenção da presa necessária nas diversas pregagens, por “cura” da calda de cimento, executa-se o tensionamento. O pré-esforço consiste na fixação do prego a uma placa de aço furada (bolacha) (Figura 4.12), que faz a transição dos esforços da ancoragem à parede de betão armado, ortogonal ao eixo da ancoragem. O pré-esforço será realizado através de um aparafusador hidráulico que aparafusa o conjunto até à tensão necessária.



Figura 4.12 - Pregagem com pré-esforço aplicado (Picote II (A), 2009)

4.4.2. Equipamentos de protecção colectiva necessários

- Sistema de ventilação adequada às condições exigidas;
- iluminação adequada e devidamente colocada;
- sinalização da zona;
- delimitação de perímetros de segurança da área de trabalho;
- definir e sinalizar correctamente vias distintas de circulação de pessoas e equipamentos.

4.4.3. Equipamentos de protecção individual necessários

➤ **Condutor do multifunções:**

- botas de protecção com biqueira e palmilha de aço;
- capacete de protecção (a usar sempre que o condutor se encontrar fora do equipamento);
- colete reflector.

➤ **Manobrador do equipamento de furação “jumbo”:**

- botas de protecção com biqueira e palmilha de aço;
- capacete de protecção;
- colete reflector;
- protecção auditiva;
- máscara de protecção;
- óculos ou viseira de protecção;
- luvas de protecção mecânica.

➤ **Manobrador da central de injeção de calda e outros trabalhadores envolvidos no processo:**

- botas de protecção com biqueira e palmilha de aço;

- capacete de protecção;
- colete reflector;
- protecção auditiva;
- máscara de protecção;
- óculos ou viseira de protecção;
- luvas de protecção mecânica;
- fato de protecção química;
- arnês de segurança (apenas para os trabalhadores que se encontrem na cesta do Manitou).

4.4.4. Aplicação do FMECA

Tabela 4.7 – Aplicação do FMECA ao método de estabilização de maciços em túneis com recurso a pregagens activas com injeção de calda.

Departamento de Engenharia Civil			1/4								
APLICAÇÃO DO FMECA AO MÉTODO DE ESTABILIZAÇÃO DE MACIÇOS EM TÚNEIS COM RECURSO A PREGAGENS ACTIVAS COM INJEÇÃO DE CALDA											
Operação	Tarefas	Modo de falha / perigo	Causa(s)	Tipo de efeito	Riscos	Efeitos / consequências	Gravidade (G)	P.Ocorrência (O)	Índice de Risco (IR)	Ações preventivas recomendadas	
Operação de estabilização de maciços em túneis, recorrendo a pregagens activas com injeção de calda	Preparação do maciço e do local de trabalho para aplicação das pregagens	Incorrecta preparação da superfície do maciço para colocação das pregagens;	• Saneamento (escombramento) mal executado.	Efeitos directos	• Queda de Materiais;	• Danos materiais;	4	4	44	• Promover fiscalização e controlo de modo a efectuar-se um correcto e seguro escombramento do maciço.	
				Efeitos indirectos	• Instabilização do maciço;	• Danos pessoais (esmagamento, entalamento, morte).	5	3	53		
		Iluminação insuficiente, deficiente ou incorrectamente orientada no local de trabalho.	• Falta de meios de iluminação;	• Iluminação colocada de forma incorrecta;	Efeitos directos	• Colapso da estrutura de estabilização.	• Danos materiais;	6	2	62	• Previsão de iluminação suficiente para a segurança dos trabalhadores e da obra;
						• Erros de execução;	• Danos materiais;	4	3	43	• Direcção dos meios de iluminação para as paredes de túnel de forma a evitar o encandeamento dos trabalhadores;
						• Projectão de betão contra os trabalhadores;	• Danos pessoais (lesões oculares, electrificação, electrocussão, fracturas, escoriações, esmagamento, atropelamento).	2	5	25	
						• Encandeamento dos trabalhadores;	• Danos pessoais (lesões oculares, electrificação, electrocussão, fracturas, escoriações, esmagamento, atropelamento).	2	4	24	
		• Mau estado de conservação das luminárias.	Efeitos indirectos	• Riscos eléctricos;	• Danos pessoais (lesões oculares, electrificação, electrocussão, fracturas, escoriações, esmagamento, atropelamento).	4	3	43			
				• Queda ao mesmo nível;	• Danos pessoais (lesões oculares, electrificação, electrocussão, fracturas, escoriações, esmagamento, atropelamento).	2	6	26			
						• Colisão entre equipamentos;	• Colisão	1	5	15	• Garantir o bom estado de conservação dos cabos eléctricos e luminárias;
								• Colisão equipamento/trabalhador.	5	4	54
	Preparação da calda de betão		Características inadequadas da calda de betão.	• Incorrecto dosamento da calda de betão (incorrecta adaptação da pregagem ao maciço).	Efeitos directos	• Queda de Materiais;	• Danos materiais;	4	4	44	• Fabrico da calda de betão com as características exigidas;
					Efeitos indirectos	• Instabilização do maciço;	• Danos pessoais (fracturas, escoriações, esmagamento, soterramento, morte).	5	3	53	• Verificar se a calda de betão que se vai injectar está conforme as respectivas especificações técnicas;
						• Colapso da estrutura de estabilização.	6	2	62		
			Equipamento de execução inadequado;	• Uso de um equipamento de perfuração não apropriado;	Efeitos directos	• Queda de Materiais;	• Danos materiais;	4	4	44	• Utilização de equipamentos adequados para uma correcta aplicação das pregagens;
• Projectão de partículas;						3	6	36	• O equipamento de furação deve conter acessórios de recolha de poeiras ou furação por via húmida, de forma a reduzir o empoeiramento;		
• Empoeiramento;						4	6	46	• Manutenção e inspecção periódica de todos os equipamentos implícitos na tarefa;		
Aplicação das pregagens	Distâncias de segurança não verificadas;	• Mau estado dos equipamentos para execução de furação e equipamento de injeção de calda);	• Incorrecta adaptação da pregagem ao maciço.	Efeitos indirectos	• Instabilização do maciço;	• Danos pessoais (fracturas, escoriações, esmagamento, perfuração, doenças respiratórias, soterramento, morte).	5	3	53	• Interdição de permanência de pessoas dentro da zona de perigo;	
					• Colapso da estrutura de estabilização.	6	2	62	• Previsão de corredores de circulação de pessoas distintos dos equipamentos;		
					• Queda de Materiais;	• Danos materiais;	4	4	44	• Delimitação de perímetros de segurança relativamente à frente de perfuração e à colocação do equipamento;	
					• Colisão equipamento/trabalhador;	• Danos pessoais (atropelamento, esmagamento, entalamento, lesões oculares).	5	4	54		
					• Projectão de partículas.	3	6	36			

Universidade de Aveiro		Departamento de Engenharia Civil								2/4		
APLICAÇÃO DO FMECA AO MÉTODO DE ESTABILIZAÇÃO DE MACIÇOS EM TÚNEIS COM RECURSO A PREGAGENS ACTIVAS COM INJECCÃO DE CALDA												
Operação	Tarefas	Modo de falha / perigo	Causa(s)	Tipo de efeito	Riscos	Efeitos / consequências	Gravidade (G)	P. Ocorrência (O)	Índice de Risco (IR)	Ações preventivas recomendadas		
Operação de estabilização de maciços em túneis, recorrendo a pregagens activas com injeção de calda	Aplicação das pregagens	Incorrecta estabilização e nivelamento das máquinas (plataforma elevatória tipo "Manitou") aquando da movimentação de cargas;	<ul style="list-style-type: none">• Rotura dos elementos de sustentação da plataforma suspensa;• Incorrecta fixação/amarração da plataforma ao equipamento de elevação de cargas;• Incorrecta colocação das sapatas niveladoras da máquina aquando da movimentação de cargas;• Movimentações bruscas do equipamento em carga;• Excesso de carga;• Equipamento de elevação colocado em zona de maciço instável ou muito desnivelado.	Efeitos directos	<ul style="list-style-type: none">• Capotamento da máquina;	<ul style="list-style-type: none">• Danos materiais;	4	3	43	<ul style="list-style-type: none">• Verificar visualmente a resistência oferecida pelo maciço e correcta estabilização e nivelamento dos equipamentos durante o desempenho das suas funções, de forma a evitar oscilações desnecessárias;• Garantir a correcta amarração da plataforma suspensa ao equipamento de elevação de cargas;• Quando o equipamento se encontrar em carga, evitar movimentações bruscas da cesta;• Proibida a permanência de trabalhadores nas zonas inferiores da plataforma suspensa;• Não exceder a capacidade de carga máxima do equipamento de elevação bem como o número máximo de pessoas na plataforma;• Escolha do equipamento de elevação adequado para trabalhos em altura e para elevação de pessoas;• Inspeção e manutenção periódica do equipamento de elevação;• Aquando da utilização de escadas manuais metálicas, garantir que estas são fixas nas suas extremidades, de forma a evitar oscilações e que se encontram em bom estado de manutenção;• Garantir que os trabalhadores que se encontram na plataforma suspensa possuem meios de segurança fixos a um ponto independente do equipamento;• Garantir que os acessórios de elevação mantêm a identificação do fabricante e marcação CE;• Garantir a correcta amarração da plataforma suspensa ao equipamento de elevação de cargas e pessoas;		
			<ul style="list-style-type: none">• Mau estado de conservação das escadas manuais metálicas;• Incorrecta fixação ou colocação das escadas manuais metálicas;• Mau estado de manutenção ou inexistência de guarda-corpos na cesta de elevação;• Mau estado de conservação do equipamento de elevação não adequado para pessoas.		<ul style="list-style-type: none">• Queda em altura;	<ul style="list-style-type: none">• Danos pessoais (fracturas, escoriações, entalamento);	5	4	54			
					<ul style="list-style-type: none">• Queda de objectos;	<ul style="list-style-type: none">• Danos pessoais (fracturas, escoriações, entalamento);	3	5	35			
					<ul style="list-style-type: none">• Queda ao mesmo nível.	<ul style="list-style-type: none">• Danos materiais;	4	3	43			
		Problemas associados à mangueira de condução do betão;		Obstrução da mangueira;		Efeitos directos	<ul style="list-style-type: none">• Fuga e derrame de betão;	<ul style="list-style-type: none">• Danos pessoais (lesões oculares, corte, fracturas, morte).	3	4	34	<ul style="list-style-type: none">• Verificação das conexões da mangueira de condução da calda de betão;
							<ul style="list-style-type: none">• Efeito chicote da mangueira.	<ul style="list-style-type: none">• Formação do manobrador do equipamento sobre o seu modo de funcionamento e perigos associados ao mesmo;	4	4	44	

Departamento de Engenharia Civil		3/4																					
APLICAÇÃO DO FMECA AO MÉTODO DE ESTABILIZAÇÃO DE MACIÇOS EM TÚNEIS COM RECURSO A PREGAGENS ACTIVAS COM INJEÇÃO DE CALDA																							
Operação	Tarefas	Modo de falha / perigo	Causa(s)	Tipo de efeito	Riscos	Efeitos / consequências	Gravidade (G)	P.Ocorrência (O)	Índice de Risco (IR)	Ações preventivas recomendadas													
Operação de estabilização de maciços em túneis, recorrendo a pregagens activas com injeção de calda	Aplicação das pregagens	Erros na execução das pregagens;	• Incorrecta orientação das pregagens nas diálases;	Efeitos directos	• Queda de materiais;	• Danos materiais;	4	4	44	• Colocação das pregagens sempre na perpendicular às diálases e nunca no sentido da diálase nem dentro da mesma;													
											• Incorrectas dimensões do furo para colocação da pregagem;	• Danos pessoais: (fracturas, escoriações, esmagamento, soterramento, morte).	5	3	53	• Escolha de trabalhadores especializados para a realização da tarefa;							
																	• Pressão inadequada aplicada na injeção da calda podendo originar vazios, pondo em causa a correcta fixação da pregagem;						
			• Insuficiente tempo de presa da calda para lhe ser aplicado o esforço, introduzido pela aplicação da chapa de aperto no prego.	Efeitos indirectos	• Colapso da estrutura de estabilização.	6	2	62	• Promover formação, informação e sensibilização sobre a forma de execução das pregagens;														
			• Aplicação de pregagens com dimensões incorrectas face às necessidades exigidas para a estabilização (diâmetro e comprimento do varão);							Efeitos directos	• Queda de Materiais;	4	4	44	• As estruturas geológicas (falhas, filões, diálases relevantes), assim como as ressurgências de água que forem assinaladas nas fichas de cartografia geológica e nas plantas deverão ser objecto de levantamento topográfico de pormenor;								
																• Quantidade insuficiente de pregagens aplicadas face às necessidades exigidas para a estabilização (malha mal definida ou insuficiente);	Efeitos indirectos	• Danos pessoais: (fracturas, escoriações, entalamento, soterramento, morte).	5	3	53	• Verificação das dimensões e da quantidade de pregagens necessárias para uma correcta e segura estabilização do maciço;	
		• Incorrecta identificação das diálases e falhas (má interpretação geológica).	Efeitos indirectos	• Colapso da estrutura de estabilização.	6	2	62	• Promover formação, informação e sensibilização sobre a forma de execução das pregagens;															
		Falta de aplicação de EPC's adequados à tarefa;								• Falta de sinalização da zona de trabalho;	Efeitos directos	• Colisão entre equipamentos;	• Danos materiais;	1	5	15	• Promover fiscalização e controlo da correcta aplicação dos EPC's necessários;						
			• Zonas de circulação de equipamentos mecânicos não definida ou não sinalizados.	• Colisão equipamentos/trabalhadores;	• Queda ao mesmo nível;	• Danos pessoais: (atropelamento, fracturas, escoriações, morte).	5	4										54	• Definir e sinalizar correctamente vias distintas, de circulação de pessoas e equipamentos;				
																				• Queda em altura.	• Danos pessoais: (atropelamento, fracturas, escoriações, morte).	1	6
• Queda em altura.	• Danos pessoais: (atropelamento, fracturas, escoriações, morte).																						

Departamento de Engenharia Civil						4/4					
APLICAÇÃO DO FMECA AO MÉTODO DE ESTABILIZAÇÃO DE MACIÇOS EM TÚNEIS COM RECURSO A PREGAGENS ACTIVAS COM INJEÇÃO DE CALDA											
Operação	Tarefas	Modo de falha / perigo	Causa(s)	Tipo de efeito	Riscos	Efeitos / consequências	Gravidade (G)	P. Ocorrência (O)	Índice de Risco (IR)	Ações preventivas recomendadas	
Operação de estabilização de maciços em túneis, recorrendo a pregagens activas com injeção de calda	Aplicação das pregagens	Falta de uso de EPI's adequados à tarefa.	• Falta de uso de EPI's por parte dos trabalhadores na execução, manipulação e injeção de calda de betão para a pregagem;	Efeitos directos	<ul style="list-style-type: none">• Projecção de calda de betão contra os trabalhadores;• Contacto directo do betão com a pele.	<ul style="list-style-type: none">• Danos pessoais: (Doenças pulmonares ou respiratória, lesões oculares, lesões a nível cutâneo, cortes, perda da capacidade auditiva).	2	6	26	<ul style="list-style-type: none">• Promover formação, informação e sensibilização aos trabalhadores que executam esta operação;• Monitorização da qualidade do ar interior nos túneis e do sistema de ventilação dos mesmos;• Minimizar a libertação de gases por parte dos equipamentos de combustão, recorrendo aplicação de catalisadores;• Promover fiscalização e controlo dos trabalhadores para o uso correcto dos EPI's necessários - (fato de protecção, botas de protecção com biqueiras e palmilha de aço, colete, luvas de protecção química e mecânica, capacete, viseira, máscara, óculos e protecção auricular);• Verificar que os trabalhadores afectos à furação utilizam roupa justa ao corpo, para que esta não se prenda no equipamento de furação.	
				Efeitos indirectos	<ul style="list-style-type: none">• Exposição prolongada a empoeiramento e a gases de combustão (equipamentos) ;• Exposição prolongada ao ruído provocado pelos equipamentos mecânicos.		4	6	46		
				• Falta de uso de EPI's por parte do manobrador do "jumbo" (equipamento de furação).							

4.4.5. Análise de dados

Após análise detalhada das tabelas de FMECA referente ao método de estabilização de maciços em túneis com recurso a pregagens activas com injeção de calda, foi possível elaborar-se o gráfico da Figura 4.13 e Figura 4.14 e a Tabela 4.8 de forma a auxiliar a interpretação dos dados obtidos, que sintetizam os resultados do índice de risco referente ao método em estudo.

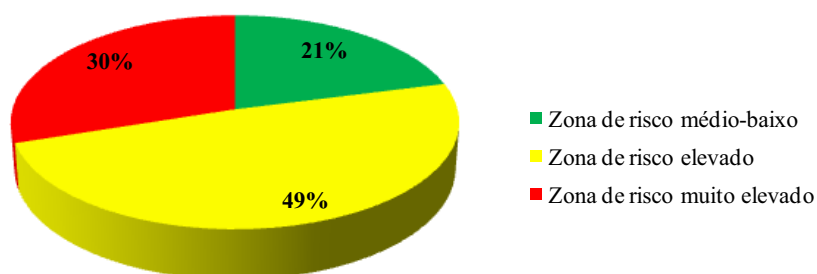


Figura 4.13 - Percentagens de valores referentes a cada zona de risco para o método de estabilização de maciços em túneis com recurso a pregagens activas com injeção de calda.

Tabela 4.8 - Análise de dados de valores máximo e mínimos de índice de risco referente a cada zona de risco, relativamente ao método de estabilização de maciços em túneis com recurso a pregagens activas com injeção de calda.

	Zona de risco médio-baixo	Zona de risco elevado	Zona de riscos muito elevados	TOTAL
Valor mínimo de índice de risco	15	34	46	15
Valor máximo de índice de risco	26	53	62	62

Analizando os resultados de acordo com a zona de risco em que se situam, pode-se concluir que os riscos associados à zona de risco elevado representam 49% da totalidade dos riscos associados ao método em análise. No entanto, verifica-se que a zona de risco médio-baixo e muito elevados representam, respectivamente, 21% e 30% dos riscos, associados ao método em análise.

Conclui-se assim que pelo facto da maior percentagem de riscos se encontrar na zona de risco elevado e muito elevado, significa que os riscos não são aceitáveis. Na zona de risco elevado, 57% (Figura 4.14-b) são classificados, quanto à gravidade, como lesões graves cuja probabilidade de ocorrência é pouco provável ou provável. Este tipo de danos, a concretizarem-se, reflectem-se em índices de sinistralidade de frequência e gravidade elevados, o que provoca elevados prejuízos devido ao absentismo e consequentemente à baixa produtividade. No entanto, o facto de existir uma percentagem significativa de riscos na zona muito elevada, devido aos danos serem extremamente graves para o trabalhador, ter-se-á que actuar objectivamente na redução do nível de risco, através de medidas que reduzam a probabilidade da ocorrência, especialmente ao nível das causas que originam riscos com classificação 54 (38,5% - Figura 4.14-c) e 62 (38,5% Figura 4.14-c). Relativamente aos riscos classificados com o nível 46, dada a percentagem significativa que representam na operação (23% - Figura 14-c), como implicam lesões graves e a probabilidade da sua ocorrência é extremamente elevada, é primordial que se proceda à eliminação dos modos de falha que lhe estão subjacentes, especialmente actuando na diminuição da probabilidade da sua ocorrência. Na zona de risco muito elevado, podem ocorrer danos cujas consequências implicam perdas irremediáveis para os trabalhadores (lesões graves ou a morte), para a empresa e para a sociedade em geral.

O método apresenta valores de índice de risco num espectro de valores entre 15 (valor mínimo) e 62 (valor máximo).

Referente à **zona de risco médio-baixo**, os valores variam entre 15 (valor mínimo) e 26 (valor máximo), onde predominam os valores de 15, 16 e 26. Estes valores indicam que apesar de existir uma elevada probabilidade de ocorrência, os danos provocados no trabalhador são de baixa gravidade. As falhas que proporcionam estes riscos consideram-se

aceitáveis, no entanto devem manter-se as acções preventivas e a eficácia das medidas de controlo, recorrendo-se a verificações permanentes.

Quanto à **zona de risco elevado**, os valores variam entre 34 (valor mínimo) e 53 (valor máximo), onde predominam os valores de 43, 44 e 53, sendo 44 o valor mais frequente (38%). Estes valores encontram-se num patamar intermédio entre a probabilidade de ocorrência e a gravidade. Desta forma verifica-se que dentro desta zona de risco elevado, predominam riscos que são prováveis de acontecer e que implicam lesões graves, podendo até provocar morte para o trabalhador. As falhas subjacentes a estes riscos devem ser reduzidas quer ao nível da probabilidade quer da gravidade. Devem ser implementadas medidas para reduzir o risco num período determinado.

Na **zona de risco muito elevado**, os valores variam entre 46 (valor mínimo) e 62 (valor máximo), onde predominam os valores de 54 e 62. Estes valores encontram-se num patamar de gravidade muito elevada e probabilidade de ocorrência média-baixa. Desta forma, verifica-se que dentro desta zona de risco muito elevado, predominam riscos prováveis de acontecer e que implicam uma ou várias mortes. As falhas que causam estes riscos devem ser totalmente eliminadas. Não se deve iniciar ou continuar o trabalho até que se tenha reduzido o nível de risco.

Verifica-se que na execução desta operação, a tarefa que apresenta índices de risco mais elevados é a aplicação das pregagens com calda e a que apresenta menores índices de risco é o processo de preparação da calda de betão.

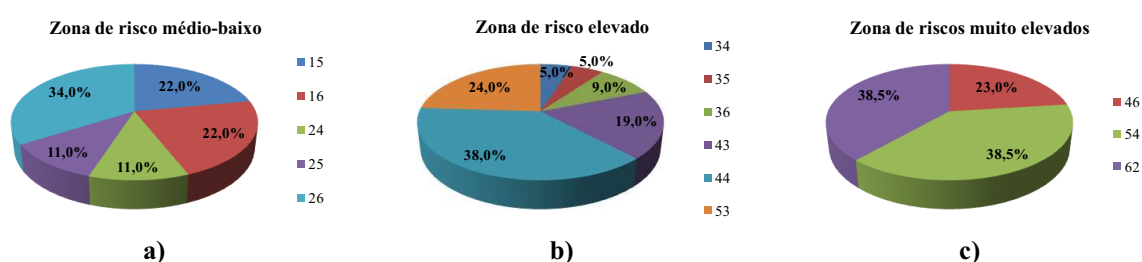


Figura 4.14 - Percentagens de cada um dos valores referentes a cada zona de risco para o método de estabilização de maciços em túneis com recurso a pregagens activas com injeção de calda.

4.5. ANÁLISE COMPARATIVA DOS MÉTODOS EM ANÁLISE

Neste ponto é feita uma análise comparativa entre os vários métodos de estabilização de maciços em túneis, estudados. Para uma melhor interpretação dos dados obtidos, foi elaborado o gráfico da Figura 4.15, que indica as percentagens do nível de risco, referente a cada zona de risco, para os vários métodos de estabilização e reforço estudados, e a Figura 4.16, que indica os mesmos resultados mas em que se efectuou o somatório dos valores correspondentes às zonas de risco elevado e muito elevado.

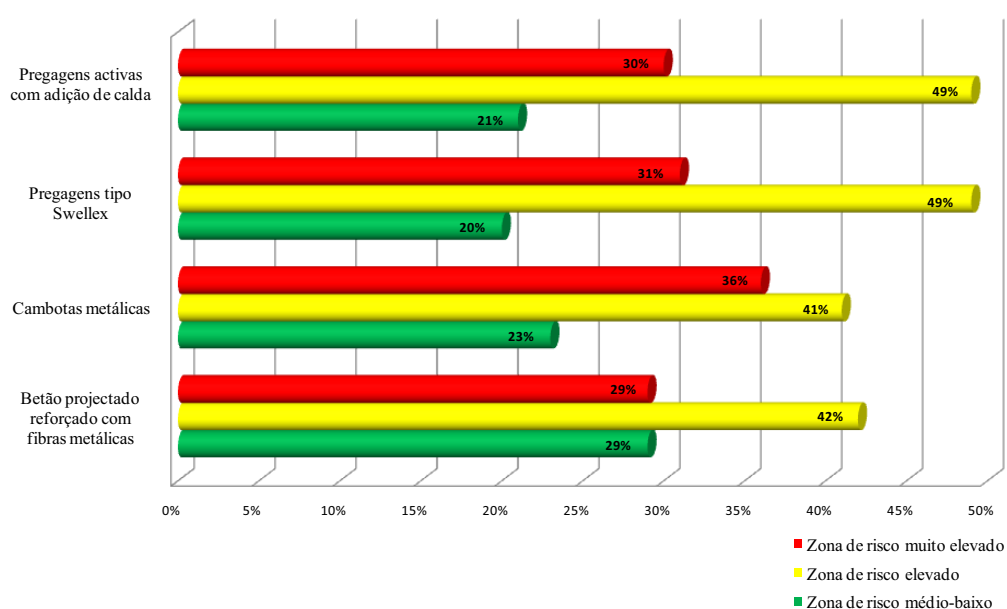


Figura 4.15 - Percentagens de valores referentes a cada zona de risco, atribuídos a métodos de estabilização e reforço de maciços em túneis.

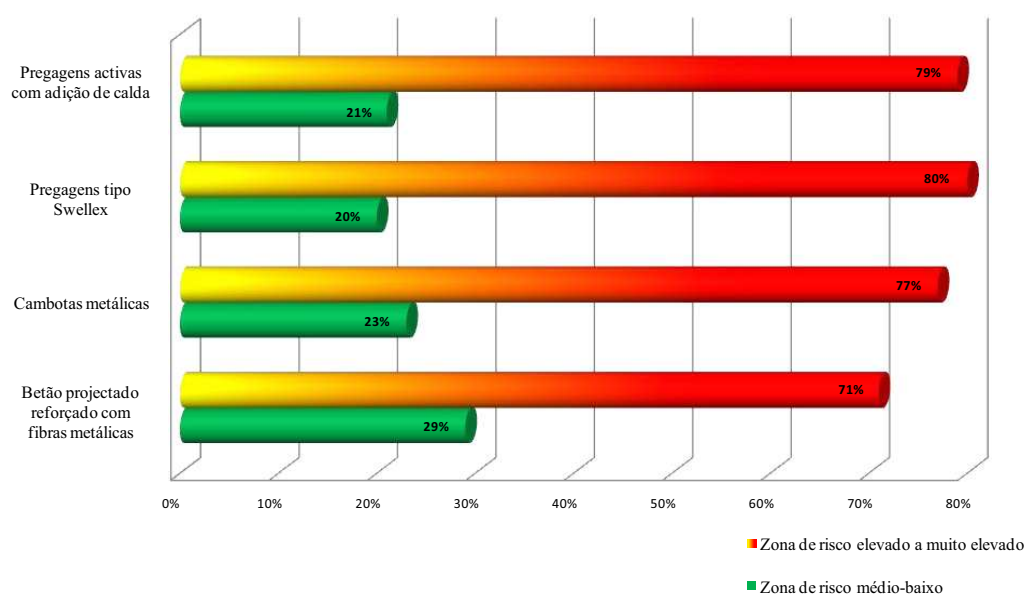


Figura 4.16 - Percentagens de valores referentes à zona de risco médio-baixo e ao somatório dos valores referentes às zonas de risco elevado e muito elevado, para métodos de estabilização e reforço de maciços em túneis.

Após a análise dos resultados indicados no gráfico da Figura 4.15, verifica-se que os métodos estudados são semelhantes entre si, relativamente ao respectivo nível de risco. Todos os métodos apresentam uma maior incidência de valores de índice de risco na zona de risco elevado, mas também, uma percentagem significativa na zona de risco muito elevado. Releva-se o facto do método de estabilização e reforço com cambotas metálicas ser o que apresenta a maior percentagem de nível de risco na zona de risco muito elevado (36%).

No entanto, após a análise dos resultados indicados no gráfico da Figura 4.16, verifica-se que, do somatório dos valores percentuais dos índices de risco referentes às zonas de risco elevado e muito elevado, é possível efectuar-se uma hierarquização dos vários métodos, concluindo-se que o método com recurso a pregagens tipo *Swellex* é o que apresenta níveis de risco mais elevados (80%), sendo por consequência o mais perigoso e, o método de estabilização com recurso a betão projectado reforçado com fibras metálicas, é o que apresenta níveis de risco menos elevados (71%), considerando-se o menos perigoso. Este facto justifica-se porque quando se recorre a pregagens tipo *Swellex*, o

maciço apresenta já grande instabilidade, que tem que ser diminuída através destas pregagens temporárias. Assim, durante esta operação os trabalhadores encontram-se expostos a uma maior probabilidade de colapso da estrutura de estabilização devido, especialmente, à incorrecta identificação das diáclases e falhas (incorrecta interpretação geológica), ao saneamento da zona de trabalho mal executado, à incorrecta adaptação da *Swellex* ao maciço, à insuficiente pressão de água aplicada na *Swellex* e à não delimitação da zona de segurança junto aos equipamentos.

Apresenta-se no ponto seguinte algumas das regras gerais de segurança a aplicar no trabalho em túneis.

4.6. REGRAS GERAIS DE SEGURANÇA EM TÚNEIS

➤ Trabalhadores

- Garantir que os trabalhadores possuem EPI's adequados ao desempenho da tarefa, antes e durante a execução da tarefa;
- garantir que os trabalhadores possuem formação específica e se encontram habilitados para o desempenho da tarefa;
- manter os trabalhadores fora do raio de acção dos equipamentos;
- garantir toda a documentação actualizada relativa aos trabalhadores.

➤ Equipamentos mecânicos e não mecânicos

- Garantir que os equipamentos de trabalho obedecem ao plano de controlo e manutenção;
- garantir que os equipamentos móveis possuem aviso de sinalização sonora de marcha-atrás, sinalização luminosa (pirilampo) e extintor de pó químico seco tipo ABC;
- garantir que os manobreadores possuem credenciação;
- garantir que a documentação relativa à máquina e ao manobrador está actualizada;
- todos os equipamentos de trabalho devem obedecer às especificações do DL nº 50/2005, de 25 de Fevereiro.

➤ Meios relacionados com evacuação e emergência

- Verificar a existência de caminhos de fuga livres e desimpedidos;
- todos os veículos que se encontram parados no interior do túnel devem estar devidamente estacionados sem obstruir a via ou a sinalética existente e sempre afastados das frentes de trabalho. Por outro lado devem encontrar-se com os quatro piscas em funcionamento, com as chaves na ignição e orientados para a saída do túnel (qualquer veículo pode servir de meio de evacuação);
- verificar a validade de todos os extintores presentes no local, bem como do seu estado de manutenção;
- garantir o correcto funcionamento da iluminação de emergência.

➤ Local de trabalho

- Manter permanentemente arrumadas as áreas de trabalho e organizar os materiais de tal modo que as tarefas se possam desenvolver sem risco acrescido;
- garantir uma adequada iluminação de todas as frentes de trabalho;
- proceder a medições e à avaliação da qualidade do ar no interior dos túneis. A avaliação da exposição dos trabalhadores a agentes químicos nos postos de trabalho, deve ser efectuada de acordo com o disposto no Decreto – Lei n.º 290/2001, de 16 de Novembro na Norma NP 1796:2004 e no Decreto – Lei n.º 162/90, de 22 de Maio, devendo proceder-se à avaliação dos teores dos seguintes agentes químicos, no ambiente de trabalho:
 - ✓ poeiras;
 - ✓ sílica livre;
 - ✓ monóxido de carbono;
 - ✓ dióxido de carbono;
 - ✓ monóxido e dióxido de azoto;
 - ✓ dióxido de enxofre.
- controlar a entrada do túnel, relativamente à entrada e saída de pessoas e viaturas, de forma a saber-se permanentemente quem se encontra no interior do mesmo, caso ocorra uma situação de emergência;
- proceder a medições para se avaliar os níveis de exposição dos trabalhadores ao ruído. A avaliação da exposição dos trabalhadores ao ruído deve ser realizada

de acordo com o estabelecido no anexo I e II do Decreto-Lei n.º 182/ 2006, de 6 de Setembro.

- proceder a medições para se avaliar a exposição dos trabalhadores a vibrações mecânicas. A avaliação da exposição dos trabalhadores a vibrações nos locais de trabalho, deve ser efectuada de acordo com o disposto no Decreto-Lei n.º 46/2006, de 24 de Fevereiro. Para as vibrações transmitidas ao corpo inteiro deve ser considerada a metodologia proposta na Norma ISO 2631-1:1997, enquanto que, para as vibrações transmitidas ao sistema mão braço se deve aplicar a Norma ISO 5349:2001 (Partes 1 e 2).

4.7. SINALIZAÇÃO DE SEGURANÇA

A sinalização de segurança é um complemento de implementação das regras básicas de segurança, servindo como meio informativo a todos os trabalhadores, quanto às suas obrigações, proibições e perigos a que estão expostos. A legislação aplicável para a sinalização de segurança e saúde no trabalho encontra-se referenciada no DL n.º 141/95, de 14 de Junho e na Portaria n.º 1456-A/95, de 11 de Dezembro. A sinalética de segurança a implementar durante a execução destes processos de estabilização está representada nas Figuras 4.17 à 4.22.



Figura 4.17 - Sinalização de obrigação



Figura 4.18 - Sinalização de perigo

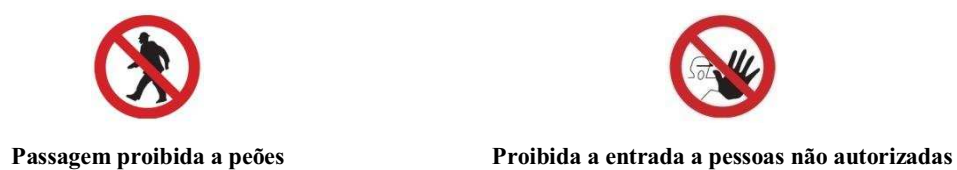


Figura 4.19 - Sinalização de proibição



Figura 4.20 - Sinalização de obstáculo



Figura 4.21 - Sinalização de emergência

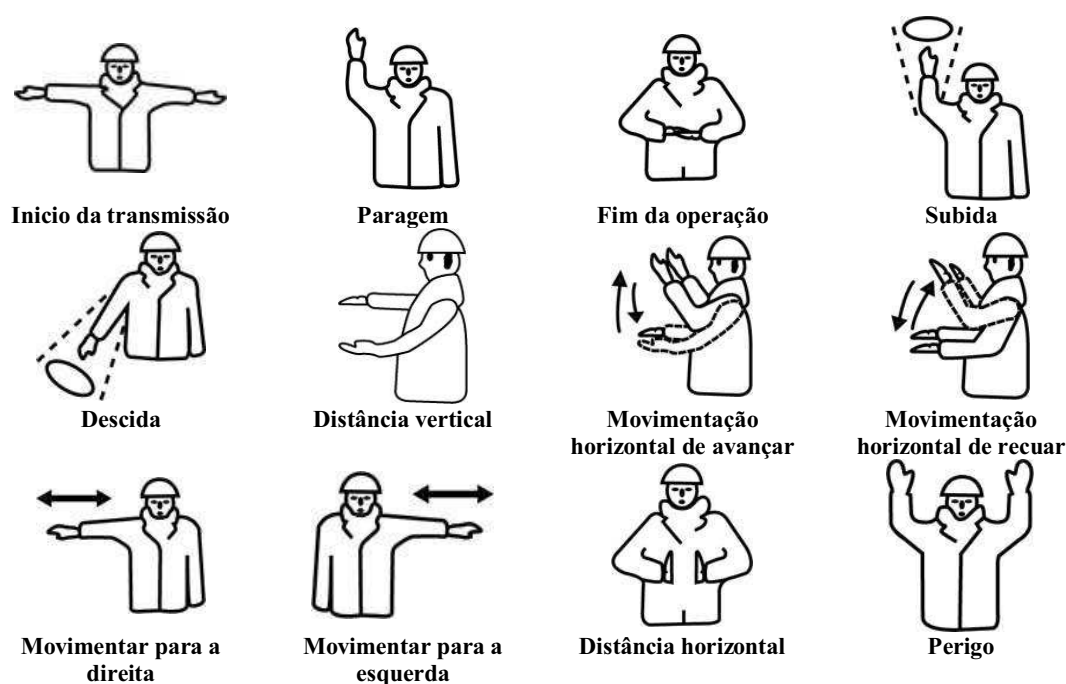


Figura 4.22 - Sinalização gestual

4.8. ACÇÕES DE FORMAÇÃO, INFORMAÇÃO E SENSIBILIZAÇÃO ESPECÍFICAS

Em seguida é apresentada a síntese e objectivos de acções específicas de formação e informação a ministrar aos trabalhadores envolvidos destas operações.

➤ Aplicação de betão projectado, pregagens com calda e tipo Swellex

- Sumário da acção:
 - ✓ Principais regras de segurança estabelecidas para a execução de pregagens e de betão projectado e para a utilização dos equipamentos intervenientes.
 - ✓ Método construtivo: furação, aplicação e selagem das pregagens, aplicação e selagem do tipo Swellex, drenagens, aplicação de betão projectado.
 - ✓ EPI's a utilizar.

- Objectivos essenciais:
 - ✓ Dar a conhecer aos trabalhadores envolvidos na actividade de pregagens e betão projectado os riscos a que estão expostos.
 - ✓ Dar a conhecer aos trabalhadores as regras de segurança a adoptar em obra.
 - ✓ Sensibilizar os trabalhadores para a correcta utilização dos EPI's.

- **Aplicação de cambotas metálicas**
 - Sumário da acção:
 - ✓ Principais regras de segurança estabelecidas para aplicação de cambotas metálicas e para a utilização dos equipamentos intervenientes.
 - ✓ Método Construtivo: carga, transporte e descarga do material, execução de sapatas, furação da zona de apoio, montagem dos perfilados metálicos no solo, elevação da cambota e ligação entre cambotas;
 - ✓ EPI's a utilizar;
 - Objectivos essenciais:
 - ✓ Dar a conhecer aos trabalhadores envolvidos na actividade de colocação de cambotas metálicas os riscos a que estão expostos;
 - ✓ Dar a conhecer aos trabalhadores as regras de segurança a adoptar em obra;
 - ✓ Sensibilizar os trabalhadores para a correcta utilização dos EPI's;

5. TESTE DA METODOLOGIA

5.1. INTRODUÇÃO

Como já foi referido anteriormente, a aplicação do método FMECA apresenta um elevado grau de subjectividade, pelo que, as classificações atribuídas aos riscos associados há operação podem tomar diferentes valores de avaliador para avaliador. Esta diferença justifica-se, pelo facto de não existirem estudos que permitam obter valores menos subjectivos para os valores da probabilidade de ocorrência de falhas, da gravidade das suas consequências e consequentes níveis de risco, para cada um dos métodos de estabilização e reforço de túneis estudados. Esta subjectividade encontra-se também subjacente a vários factores inerentes ao avaliador, entre os quais, o conhecimento dos métodos de avaliação de riscos a aplicar, a experiência profissional bem como o domínio do processo produtivo em análise.

Para obter algum consenso e “aprovação” relativamente aos resultados obtidos, foi solicitado a técnicos com experiência no tema em estudo que se pronunciassem sobre o estudo realizado, método aplicado e resultados obtidos. Desta forma, recorreu-se a dois grupos de técnicos de cada uma das obras de reforço de potência das barragens de exploração hidroeléctrica de Bemposta II e de Picote II, que incluem a equipa de coordenação de segurança e saúde, a equipa de segurança da entidade executante e o Engenheiro responsável por parte do Dono da Obra (EDP).

Assim, foi pedido a cada grupo, qual a escala de classificação do índice de risco que consideram mais adequadas e eficazes, relativamente à utilizada e às propostas (ponto 3.4). Foi-lhes também solicitado que procedessem à avaliação de riscos de cada um dos processos estudados, tendo-lhes sido fornecidas as tabelas de avaliação de riscos aplicadas neste trabalho, nas quais procederam à avaliação. O documento referente ao teste de metodologia entregue aos grupos de técnicos encontra-se no Anexo I.

5.2. METODOLOGIA

A metodologia de teste visa que o grupo de técnicos:

- se pronuncie sobre adequabilidade e eficácia das escalas de nível de risco utilizada e propostas;

- aplique a metodologia utilizada nesta dissertação na avaliação de riscos efectuada, a cada uma das operações de estabilização e reforço de túneis, estudadas.

5.3. RESULTADOS E CONCLUSÕES DO TESTE

Após análise dos resultados da opinião e avaliação das equipas de técnicos que responderam, foi possível verificar qual a opinião dos mesmos face à adequabilidade e eficácia das escalas de nível de risco utilizada e propostas, bem como à avaliação atribuída em cada uma das tabelas de avaliação de risco relativas a cada uma das operações de estabilização e reforço de túneis, estudadas.

Desta forma, após análise dos dados referentes à opinião sobre a adequabilidade e eficácia das escalas de nível de risco utilizada e propostas, verificou-se que existe uma divergência de opiniões. Desta forma verificou-se que o grupo A (equipa de segurança de Bemposta II), composto por três técnicos decidiu que, *“A tabela 3.1 é a mais indicada, pelo facto de ser mais razoável de gerir”*. Por outro lado o Engenheiro responsável pela segurança dos dois empreendimentos, por parte do dono de obra afirma que: *“manifesto, como meu parecer, mais adequada a Tabela 3.4, com a possibilidade de integração das escalas de índice de risco 42 e 41, na zona de risco elevado (cor amarela), uma vez que as lesões graves (4) - escala de gravidade (G) não devem inserir-se em zona de risco médio-baixo (cor verde) na Tabela 3.5”*

Relativamente à análise dos dados obtidos nas tabelas de avaliação de riscos por parte dos técnicos, foi possível elaborar os gráficos da Figura 5.1 e Figura 5.2 e a Tabela 5.1 que permitem sintetizar os resultados obtidos.

Após análise do gráfico da Figura 5.1, verificou-se que 86,4% dos valores atribuídos na avaliação de riscos diferem relativamente às avaliações de risco realizadas neste trabalho. No entanto, foram realizadas outras abordagens de análise dos resultados obtidos, de forma a melhor entender o grau de influência que apresentam os resultados diferentes. Desta forma através da análise dos resultados da tabela 5.1, é possível verificar que, apesar de 86,4% dos valores diferirem dos obtidos, 39,6% desses valores encontram-se na mesma zona de risco que os atribuídos neste trabalho e que 19,4% dos valores diferentes dos atribuídos neste trabalho apenas diferem de um dígito, variando este apenas de uma unidade, o que nos permite afirmar que estes valores não diferem muito dos atribuídos pois devido à subjectividade das qualificações, um valor com um dígito diferente (variando apenas de uma unidade) pode ser considerado semelhante ou muito aproximado do

atribuído neste trabalho. No entanto, de forma a melhor entender os 19,4% dos valores que diferem apenas de 1 dígito, foi feita uma outra análise, da qual foi possível construir o gráfico da figura 5.2. Através da análise deste gráfico, foi possível verificar-se que dos 19,4% dos valores atrás referidos, 49,2% diferem do dígito da gravidade e 50,8% diferem do dígito da probabilidade de ocorrência, considerando-se que o facto de diferir do grau de probabilidade de ocorrência seja menos importante que diferir do dígito relativo à gravidade.

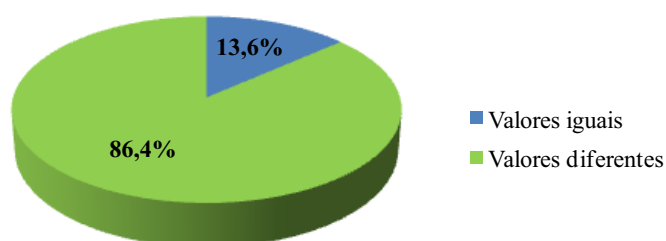


Figura 5.1 - Percentagens de valores iguais ou diferentes, relativamente aos obtidos

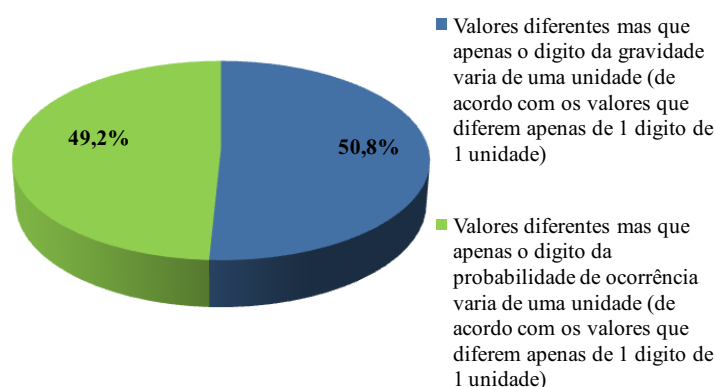


Figura 5.2 - Valores que diferem apenas de uma unidade no dígito relativo à gravidade ou relativo à probabilidade (no conjunto de valores que diferem em apenas 1 dígito de uma unidade)

Tabela 5.1 - Percentagens de valores diferentes que se situam na mesma zona de risco e de valores diferentes mas com um dígito igual e outro que difere de uma unidade, relativamente aos 86,4% de valores diferentes dos obtidos.

	Valores diferentes mas na mesma zona de risco (dos valores diferentes)	Valores diferentes mas com um dígito igual e outro que difere de uma unidade (dos valores diferentes)
Betão projectado reforçado com fibras metálicas	47,6%	21,7%
Cambotas metálicas	34,3%	20,0%
Pregagens tipo <i>Swellex</i>	39,5%	20,5%
Pregagens activas com injeção de calda	37,1%	15,5%
MÉDIA GLOBAL	39,6%	19,4%

Releva-se o facto desta diferença de valores se poder dever ao facto de apenas um grupo de técnicos ter respondido ao solicitado. Com um maior número de respostas poder-se-á obter um teste mais efectivo dos valores da avaliação obtida neste trabalho

Quanto às escalas de valoração do nível de risco obtiveram-se 3 respostas que optaram pela Tabela 3.1 e uma que optou pela Tabela 3.4. Também relativamente a este assunto, seria necessário a obtenção de um maior número de opiniões para se poder efectivamente concluir pela tabela de graduação mais adequada e eficaz.

A continuação deste trabalho releva-se no entanto de elevada importância, para se obter uma aferição quer de tabelas quer de níveis de risco dos processos estudados.

6. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

6.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao concluir este trabalho considera-se que foram atingidos os objectivos fundamentais inicialmente propostos, apesar da complexidade e diversidade que envolve a temática da construção e estabilização de túneis.

Neste trabalho foram elaboradas tabelas de avaliação de riscos, com base no método de Análise dos Modos de Falha, Efeitos e Criticidade – FMECA, aplicadas aos métodos mais representativos de reforço de maciços na construção e/ou reabilitação de túneis, permitindo assim sistematizar as possíveis falhas e riscos de cada método, de forma a chegar aos valores dos respectivos índices de risco. Com base nestes índices, foi possível analisar cada método separadamente e segundo uma análise conjunta de todos eles. Foi proposta uma possível hierarquização dos vários métodos relativamente à segurança.

Apresenta-se nas secções seguintes um resumo dos principais aspectos do trabalho desenvolvido, destacando-se os principais resultados e trabalhos a desenvolver futuramente.

6.2. DIFICULDADES SENTIDAS

Apesar da construção ou reabilitação de túneis ser um tipo de obra que se desenvolve desde tempos remotos, não são obras frequentes. Este facto provocou uma dificuldade no sentido de consolidar os aspectos teóricos com os práticos da temática em estudo. No entanto, devido ao actual investimento Nacional em obras de reforço de potência das barragens de exploração hidroeléctrica, foi possível efectuar-se um acompanhamento prático de duas obras em curso, de reforço de potência em Bemposta II e Picote II, permitindo fazer face ao problema.

Além disto a execução de uma avaliação de riscos, implica uma análise muito detalhada do tema a tratar, tendo sido necessário um estudo muito intensivo e aprofundado dos métodos de estabilização analisados. No alcance deste objectivo surgiram dificuldades em obter informação detalhada sobre os métodos em estudo e a respectiva avaliação de

riscos, colmatada pelo acompanhamento das obras referidas e estudo dos respectivos projectos.

Como já referido, outra dificuldade encontrada incidiu na aplicação das escalas do método de FMECA, pois a sua aplicação directa, não era propriamente a mais indicada ao caso de estudo. Outro aspecto da não aplicação das escalas existentes deveu-se à falta de estudos e informação probabilística sobre a temática em estudo. De forma a fazer face a este problema houve a necessidade de se adaptarem as escalas referentes ao método.

Outra dificuldade sentida residiu na hierarquização dos vários métodos do ponto de vista da segurança, dada a semelhança de resultados obtida.

A realização do teste dos resultados obtidos foi dificultada pela recolha limitada de respostas.

6.3. SÍNTESE DE RESULTADOS

Neste ponto, pretende-se resumir e realçar alguns dos resultados considerados de maior relevância, na sequência do desenvolvimento dos capítulos desta dissertação.

No **Capítulo 2**, efectuou-se uma revisão bibliográfica, sobre a temática da construção, reforço e estabilização de túneis. Com esta investigação foi possível conhecer-se os tipos de túneis existentes relativamente ao seu processo de escavação, bem como às acções actuantes. Nesta revisão, foi estudado todo o processo construtivo de um túnel, desde o seu planeamento, métodos de escavação e de estabilização. Nesta análise foi possível concluir-se que o planeamento prévio de um túnel apresenta sub-operações fulcrais para um correcto e seguro desenvolvimento de todo o processo construtivo. Foram analisadas as Normas OHSAS 18001:2007 onde foi possível entender-se melhor alguns conceitos importantes para o objectivo do estudo. Outro ponto focado neste capítulo foram os acidentes ocorridos em túneis.

Esta revisão permitiu ter uma visão global relativamente aos processos de escavação e estabilização de túneis bem como à evolução de conceitos.

No **Capítulo 3**, foi efectuada uma pesquisa bibliográfica sobre o **Método de Análise de Falhas e Efeitos – FMEA (Failure Modes and Effects Analysis)** e a sua adaptação para a realização de análise semi-quantitativa designada por FMECA, que permite uma análise dos modos de falha, dos seus efeitos e criticidade, através da aplicação de escalas de

probabilidade de ocorrência das falhas e de gravidade dos seus efeitos. Este estudo permitiu compreender o seu modo de funcionamento, para a sua correcta aplicação às diferentes técnicas de estabilização de túneis, permitindo avaliar os seus níveis de fiabilidade construtiva e de segurança.

No **capítulo 4**, é feita a aplicação do FMECA aos vários métodos de estabilização analisados. Para uma melhor interpretação de toda a envolvente dos métodos, foi feita uma descrição dos processos construtivos, dos EPC's e EPI's de uso obrigatório, bem como das principais regras de segurança a implementar nas operações em túneis. Após aplicação e análise dos dados obtidos, conclui-se que a cada método está associada a maior incidência de valores de índice de risco na zona de risco elevado, verificando-se no entanto, que a zona de risco muito elevado em qualquer um dos métodos representa valores muito significativos de índice de risco (cerca de 30% ou superior). Verificou-se que os quatro métodos de estabilização e reforço de túneis apresentam níveis de risco muito semelhantes, sendo no entanto, o método de estabilização com recurso a betão projectado, o que apresenta menor percentagem de valores correspondentes à zona de risco elevado e muito elevado e o método de estabilização com recurso a pregagens tipo Swellex o que apresenta maiores percentagens do somatório destes valores.

Verifica-se também, que os modos de falha quer pela sua gravidade quer pela probabilidade da sua ocorrência, estão intrinsecamente relacionados com a instabilidade dos maciços, o que também condiciona a escolha do tipo de método de estabilização e reforço a aplicar.

No **capítulo 5** procedeu-se ao teste da metodologia aplicada. Através deste teste foi possível concluir-se que a aplicação do método FMECA apresenta um elevado grau de subjectividade, pelo que, as classificações atribuídas aos riscos associados às operações podem tomar diferentes valores de avaliador para avaliador. Por outro lado podemos concluir que apesar de 86,4% dos valores diferirem dos atribuídos neste trabalho, grande parte destes valores podem ser considerados semelhantes aos obtidos, pelo facto de, por um lado se encontrarem na mesma zona de risco ou por apenas diferirem de um dígito, o qual varia apenas de uma unidade.

6.4. CONCLUSÕES FINAIS

Recolheu-se e sistematizou-se informação relativa à avaliação de riscos em operações de reforço e estabilização de maciços em túneis com recurso a betão projectado reforçado com fibras metálicas, a cambotas metálicas, a pregagens tipo *Swellex* e com injeção de calda. Esta recolha e sistematização de conhecimento diversificado, será uma ferramenta útil de apoio aos técnicos intervenientes nestas operações, no âmbito da identificação de perigos e avaliação de riscos e consequente adopção de medidas que os minimizem, na impossibilidade de os eliminarem.

No decorrer deste trabalho, foi possível verificar que o método de análise de falhas, FMECA, apresenta um elevado grau de subjectividade pois, as classificações dos riscos podem variar de avaliador para avaliador consoante o seu grau de experiência e de profundidade de conhecimento da área em estudo. Este conceito de subjectividade foi comprovado através do teste de metodologia realizado, onde foi possível verificar a variação das classificações atribuídas pelos diferentes técnicos. No entanto a aplicação deste método revela-se de grande importância devido ao grau de pormenor de que se reveste a análise dos processos, respectivos modos de falha e efeitos e dos riscos associados.

Após análise detalhada dos valores obtidos, cada um dos métodos analisados, apresenta grande incidência de valores de índice de risco em zona de risco elevado, no entanto, pode verificar-se que a zona de riscos muito elevados representa em todos os métodos uma percentagem muito significativa dos valores de índice de risco, o que os torna inaceitáveis.

A hierarquização dos métodos foi dificultada pela semelhança dos modos de falha existentes entre os métodos de reforço e estabilização estudados, e consequente semelhança dos níveis de risco atribuídos. No entanto, após uma análise global dos vários métodos, verificou-se que quando se procede ao somatório dos valores percentuais dos índices de risco referentes às zonas de risco elevado e muito elevado, é possível efectuar-se uma hierarquização dos vários métodos, tendo-se concluído que o método de estabilização com recurso a pregagens tipo *Swellex* é o que apresenta níveis de risco mais elevados (80%), sendo por consequência mais perigoso, e o método de estabilização com recurso a

betão projectado reforçado com fibras metálicas é o que apresenta níveis de risco menos elevados (71%), considerando-se menos perigoso.

Com este trabalho conclui-se que a execução de um túnel é um dos desafios mais complexos no campo da engenharia, sendo que, no reforço e estabilização dos respectivos maciços, estão associadas operações que aplicam diversas tecnologias com níveis de risco elevados. Associada à complexidade e diversidade das operações que este tipo de obra engloba, a garantia de níveis de segurança elevados é prioritária.

6.5. INVESTIGAÇÕES FUTURAS

No seguimento deste trabalho dar-se-á continuidade à aplicação da metodologia de avaliação desenvolvida a outros métodos de estabilização e escavação de túneis.

Deve-se também proceder à recolha de todo o tipo de informação referente a acidentes ou incidentes ocorridos em túneis, sendo eles de maior ou menor gravidade, de modo a constituir uma base de dados extensa, que permita melhorar as avaliações de riscos referentes à temática dos túneis do ponto de vista da segurança.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACT Lisboa (2009)

“Relatório de acidente ocorrido na obra Venda Nova II de reforço de potência do aproveitamento hidroeléctrico de Venda Nova”

Consultado em Fevereiro de 2009.

Agostinho E., Trigo P. (2006)

“Os Empreendimentos Através dos Tempos”

ISEC, 2006 – Gestão de empreendimentos.

Atlas Copco (2008)

“Produtos e Soluções para Minas, Perfuração, Demolição - Sustimento de Rocha”

Soc. Atlas Copco de Portugal Lda, Disponível em:

http://www.atlascopco.pt/ptus/Aboutus/sales/012_Sales_Construcao_e_Minas/,
consultado a 18-02-2009

Bastos, Mário (1998)

“A geotecnia na concepção, projecto e execução de túneis em maciços rochosos”

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Georrecursos – Área de Geotecnia
Instituto Superior Técnico

Bemposta II (2009)

Fotos recolhidas da obra da EDP de **“Reforço de potência da barragem de exploração hidroeléctrica de Bemposta II”**

Estágio em obra, Março de 2009

Carreto, J. R. (2000).

“Jet Grouting. A Developing Techinque - VII Congresso Nacional de Geotecnia”

Tese para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

Castro, L. (2004)

“Método *cut-and-cover*, grandes valas a céu aberto na avenida Jabaquara”

Companhia do Metropolitano de São Paulo. Disponível em:

<http://www.railbuss.com/noticias/view.php?id=1385>, consultado a 22 de Outubro de 2008.

Cigla, M., S. Yagiz, et al. (2001)

“Application of Tunnel Boring Machines in Underground Mine Development”

Department of Mining Engineering, Colorado, USA.

Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens (2005)

“Grupo de trabalho de análise de riscos em barragens”

1º Relatório de progresso, Janeiro de 2005

Companhia do Metropolitano de São Paulo, *Copyright 2008*

Disponível em:

<http://www.metro.sp.gov.br/tecnologia/construcao/subterraneo/tesubterraneo.shtml> ,
consultado a 17 de Outubro de 2008.

Construlink (2008)

“Guião de obras – Metro da Amadora – Toscos da galeria”

Disponível em: www.construlink.com , consultado a 23 Fevereiro 2009

Costa, A. (2006).

"Apontamentos da disciplina de Patologia das Construções" Capítulo III

Universidade de Aveiro

Fernandes, J.(2005)

“Proposição de Abordagem Integrada de Métodos da Qualidade Baseada no FMEA”

Dissertação apresentada para a obtenção de grau de Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de produção e Sistemas, Pontifícia Universidade Católica do Paraná.

FMEA, 2009

Disponível em:

http://en.wikipedia.org/wiki/Failure_mode_and_effects_analysis#cite_ref-MIL-P-1629_1-0

Consultado a 11-05-2009

Gomes, A. T. (1998).

“Túneis Urbanos Sujeitos a Solicitações não Uniformes”

Tese para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto

Guerreiro (2000)

“Exploração subterrânea de mármore, Aspectos geotécnicos”

Dissertação para a Obtenção do Grau de Mestre em Georrecursos – Área de Geotecnia

Universidade técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico

Harris, B. (2006).

“How Stuff Works - Como funcionam os túneis”

Publicado em 04 de Novembro de 2006. Disponível em,

<http://ciencia.hsw.uol.com.br/tunel.htm> consultado a 27 de Outubro de 2008.

HOEK, E.; KAISER, P. K.; BAWDEN, W. F. (1998)

“Support of Underground Excavations in Hard Rock”

A. Balkema. Rotterdam. Brookfield.

Inspecção Geral do Trabalho, (2005)

“A Inspecção do Trabalho e os Inquéritos de Acidente de Trabalho e Doença Profissional”

Data de revisão: Setembro 2005

Disponível em:

http://www.igt.gov.pt/DownLoads/content/A_Inspeccao_do_Trabalho_e_os_Inqueritos%20de_Acidente%20de_Trabalho_e_Doenca_Profissional.pdf , consultado a: 15-05-2009

Instituto Geológico Mineiro (1999)

“Regras de Boa Prática no Desmonte a Céu Aberto”

Disponível em: http://e-geo.ineti.pt/edicoes_online/diversos/boa_pratica/capitulo2.htm ,

consultado a: 18-05-2009

Kiriyama, K. et al. (2005)

“Structure and Construction Examples of Tunnel Reinforcement Method Using Thin Steel Panels”

Nippon Steel Technical Report, No. 92 July 2005

Disponível em, <http://www.nsc.co.jp/en/tech/report/pdf/n9209.pdf> , consultado a 17 de Outubro de 2008.

Li C. and Håkansson U. (1999)

“ Rock Support and Reinforcement Practice in Mining, Performance of the Swellex bolt in hard and soft rocks”

Balkema, Rotterdam (Luleå University of Technology, Sweden), (Jacobson & Widmark AB, Sweden).

Lluna, Germán (1997)

“Sistema de Gestión de Riesgos Laborales e Industriales”

Editorial MAPFRE, S.A. Madrid

Loyola, L., Nunes W. et al. (2007)

“De quem é a culpa? A tragédia em São Paulo foi provocada por uma soma de erros. Eis os principais pontos”

Época Noticias, 19/01/2007, Edição nº 453

Maccaferri (2008).

Disponível em, <http://www.maccaferri-usa.com/Tunnels.aspx> consultado a 17 de Outubro de 2008.

Maffei, Mello, *et al.* (2008).

"As causas do acidente da Estação Pinheiros da Linha 4 do Metro de São Paulo."

Revista Técnica, Copyright © 2008 - Editora PINI Lda.

Managing Risk (2007)

“OHSAS 18001:2007, Principais Alterações e Regras de Transição”

DNV, 30 Novembro 2007

Metro Lisboa (2006)

“ Glossário técnico - Métodos de Execução da Galeria em Túnel”

COPYRIGHT © 2006 Metropolitano de Lisboa

Disponível em, <http://www.metrolisboa.pt/Default.aspx?tabid=730> consultado a 17 de Outubro de 2008.

Metro.SP.Gov. (2008)

“O metro de subterrâneo”

Companhia do Metropolitano de São Paulo, *Copyright 2008*

Disponível em,

<http://www.metro.sp.gov.br/tecnologia/construcao/subterraneo/tesubterraneo.shtml>
consultado a 17 de Outubro de 2008.

Miguel, A. (2004)

“Manual de Higiene e Segurança do Trabalho”

Porto Editora, 7.^a edição.

Picote II (A) (2009)

Fotos recolhidas da obra da EDP de **“Reforço de potência da barragem de exploração hidroelétrica de Picote II”**

Estágio em obra, Março de 2009

Picote II (B) (2009)

“Planos de trabalho com riscos especiais da obra da EDP de reforço de potência da barragem de exploração hidroelétrica de Picote II”

Estágio em obra, Março de 2009

Pinheiro, R. (2004).

“Materiais para Infra-Estrutura de Transporte – Túneis”

Universidade Federal de Santa Maria, Brasil

REFER (2008)

Foto recolhida da obra da REFER da **“Ligação ferroviária ao Porto de Aveiro”**

Visita à obra, Novembro de 2008

Revista Técnica (2008)

"Relatório técnico - Acidentes em Túneis Urbanos."

Edição 136, Julho de 2008

Disponível em, http://revistatechne.com.br/engenharia-civil/136/imagens/Relatorio_4.4.pdf, consultado a 15-10-2008

Rodrigues, M. Fernanda (2008)

"Estado de Conservação de Edifícios de Habitação a Custos Controlados – Índice de Avaliação e Metodologia para a sua Obtenção."

Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro.

Roxo, Manuel (2003)

"Segurança e Saúde do Trabalho: Avaliação e Controlo de Riscos"

Livraria Almedina

SGS (2007)

"Plano de transição da SGS ICS / OHSAS 18001:2007"

Documento PDF de SGS, Outubro 2007

Silva, S. R. C., Fonseca, M., Brito, J.(2006)

" Metodologia FMEA e sua aplicação à construção de edifícios"

QIC 2006 – Encontro Nacional sobre Qualidade e Inovação na Construção.
LNEC, Lisboa 21 a 24 de Novembro

Stamatis, D.H. (2003)

"Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution"

Quality Press, 2nd Edition.

Teixeira, Ricardo (2008)

"Alterações da norma OHSAS 18001:2007"

APCER, Associação Portuguesa de Certificação, 25 de Fevereiro de 2008

Torres, V. N. e C. D. D. Gama (2004)

"Predição do DTW (Damager to Tunnel Wall) na escavação de túneis com explosivo, baseado da velocidade de propagação das ondas P no maciço rochoso"

9.º Congresso de Geotécnica, Aveiro 16 a 24 de Abril de 2004

Vieira, Flávio (2003)

“ Execução de túneis em N.A.T.M. (*New Austrian Tunneling Method*) para obras de saneamento”

Trabalho de conclusão de curso apresentado á Universidade Anhembi Morumbi no âmbito do Curso de Engenharia Civil com ênfase Ambiental, São Paulo

Wang, Wilhelm (2007).

**“Sistema de Gestão de Saúde e Segurança Ocupacional OHSAS 18001:2007
Aplicação...Realização...e Integração”**

Apresentação de BSI Management Systems, São Paulo, Brasil 03 de Dezembro de 2007

Wikipédia (A) (2009)

“Túnel de Alhadas”

Wikipédia, a enciclopédia livre

Disponível em:

http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=T%C3%BAnel_de_Alhadas&oldid=14169247

Consultado a 11-02-2009

Wikipédia (B) (2009)

“Túnel de Chão de Maçãs”

Wikipédia, a enciclopédia livre

Disponível em:

http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=T%C3%BAnel_de_Ch%C3%A3o_de_Ma%C3%A7%C3%A3s&oldid=14092199

Consultado a 11-02-2009

Wikipédia (C) (2009)

“ Túnel do Marquês”

Wikipédia, a enciclopédia livre

Disponível em:

http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=T%C3%BAnel_do_Marqu%C3%AAs&oldid=13646270

Consultado a 11-02-2009

Wikipédia (D) (2009)

“ Túnel do Rossio”

Wikipédia, a enciclopédia livre

Disponível em:

http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=T%C3%BAnel_do_Rossio&oldid=14169225

Consultado a 11-02-2009

ANEXO I

TESTE DE METODOLOGIA

TESTE DE METODOLOGIA

O presente “teste de metodologia” tem por base a fundamentação da metodologia usada na dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. Com este teste pretende-se “validar” o método usado bem como os dados obtidos.

Desta forma é pedido que interprete as seguintes questões e que se pronuncie sobre elas, expressando as suas ideias e opiniões.

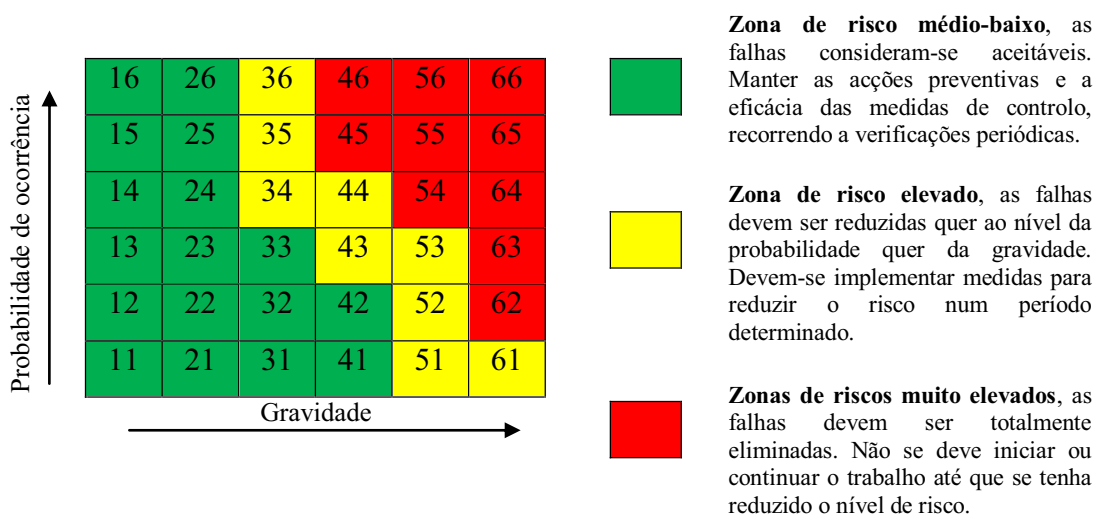
- 1) Interprete atentamente as escalas que se seguem e pronuncie-se pela adequabilidade e eficácia das escalas de nível de risco, utilizada e propostas.

Nota explicativa:

De modo a efectuar-se uma avaliação de riscos dos métodos mais representativos de reforço e estabilização de maciços, na construção e/ou reabilitação de túneis, recorreu-se à aplicação do método de análise de risco FMECA (Análise dos Modos de Falha, Efeitos e Criticidade).

A aplicação deste método, tem por base qualificar o risco de acordo com a sua gravidade e a probabilidade de ocorrência. Desta forma foram elaboradas escalas de gravidade (G) e de probabilidade de ocorrência (O). Através da associação deste dois dígitos resulta o valor de índice de risco de cada “risco” associado às falhas, permitindo analisar cada uma delas. Esta referência do risco permite a construção de um quadro de criticidade (Tabela I-1), no qual a gravidade (Tabela I-2) se encontra representada em abcissa e a probabilidade de ocorrência (Tabela I-3) nas ordenadas.

Tabela I-1 - Escala de índice de risco (Adaptado de Lluna (1997: 216) e de Roxo, (2003:200))



Desta forma, a **escala de índice de risco** varia num espectro de valores de 11 (correspondente ao risco mínimo) a 66 (correspondente ao risco máximo). A **escala de gravidade** estabelece seis níveis de classificação, numerados de 1 a 6, por ordem crescente de gravidade do risco. Estes níveis apresentam-se qualificados na Tabela I-2

Tabela I-2 - Escala de gravidade (Adaptado de Lluna, (1997) e de Roxo, (2003:195 a 200))

Escala de gravidade (G)	
Danos muito superficiais que levam à interrupção do trabalho por um intervalo de tempo inferior a um dia de trabalho.	1
Danos superficiais, cortes, entalamento, irritação dos olhos, dor de cabeça, incomodidade e todas as restantes situações que são passíveis de causar lesões que levem à ausência do trabalhador por um período superior a 1 dia e inferior a 3 dias de trabalho (excluindo o dia do acidente).	2
Fracturas menores ¹ , dermatoses, transtornos músculo-esqueléticos, incapacidades temporárias ² . Lesões estas que levam à ausência do trabalhador por um período superior a 3 dias de trabalho (excluindo o dia do acidente ³).	3
Lesões graves ⁴ , que provoquem lesões e incapacidades permanentes ⁵ . Lesões estas que levam à ausência do trabalhador por um período superior a 3 dias de trabalho (excluindo o dia do acidente ²⁴).	4
Acidente mortal (um)	5
Mais do que uma morte	6

¹ Consideram-se fracturas menores, as provocadas em dedos à excepção dos polegares ou dedos do pé (segundo **RIDDOR - Reporting of Injuries, Diseases and Dangerous Occurrences Regulations**, 1995, Reino Unido *cit. in* IGT, 2005).

² Incapacidade temporária (10.^a Conferência Internacional dos Estatísticos do Trabalho retomada pela 16.^a conferência em 1998 *cit in* Miguel, A. (2004)) define-se por “*acidentes de que resulte para a vítima incapacidade de pelo menos, um dia completo (8 horas) além do dia em que ocorreu o acidente, quer se trate de dias durante os quais a vítima teria trabalhado, quer não. Neste último caso temos o que, vulgarmente, se designa por acidente com baixa ou incapacidade temporária absoluta*”

³ O dia do acidente não é contabilizado pois, todos os encargos desse dia de ocorrência são suportados pela entidade empregadora.

⁴ Lesões graves segundo **RIDDOR - Reporting of Injuries, Diseases and Dangerous Occurrences Regulations**, 1995, Reino Unido *cit. in* IGT, 2005: Qualquer fractura à excepção dos dedos, que não sejam os polegares ou os dedos do pé; amputação; deslocação do ombro, da anca, do joelho ou lesão da coluna vertebral; perda temporária ou permanente da visão; queimadura química, de metal quente ou algum ferimento penetrante na vista; queimaduras e outros ferimentos provocados pela corrente eléctrica que conduzam à inconsciência, à necessidade de reanimação ou exijam internamento hospitalar por mais de 24 horas; qualquer situação que conduza à hipotermia, à hipertermia, à inconsciência, que implique necessidade de reanimação ou que exija internamento hospitalar por mais de 24 horas; inconsciência causada por asfixia ou pela exposição a uma substância perigosa ou a um agente biológico; intoxicação aguda que requeira tratamento médico, ou determine a perda da consciência em resultado da absorção de alguma substância por inalação, por ingestão ou através da pele; intoxicação aguda, que requeira tratamento médico, provocada pela exposição a um agente biológico, suas toxinas ou a material infectado.

⁵ Incapacidade permanente (10.^a Conferência Internacional dos Estatísticos do Trabalho retomada pela 16.^a conferência em 1998 *cit in* Miguel, A. (2004)) define-se por “*acidentes de que resulte para a vítima, com carácter permanente, deficiência física ou mental ou diminuição da capacidade de trabalho*”

A classificação atribuída ao nível 3 e 4 da escala de gravidade, como falhas causadoras de lesões que levam à ausência do trabalhador por um período superior a 3 dias de trabalho (excluindo o dia do acidente) teve por base a comunicação de acidentes de trabalho sobre o que a “*A directiva-quadro 89/391/CEE (art.º 9º/1-c) e o Código do Trabalho (art.º 275º/3-j) referem o conceito de "ausência superior a três dias úteis". Na definição deste conceito as Estatísticas Europeias de Acidentes de Trabalho – EEAT⁶ apenas consideram dias inteiros de ausência ao trabalho, excluindo o dia do acidente. Consequentemente, "ausência superior a três dias" significa "pelo menos quatro dias", o que implica que apenas se incluem acidentes cujo regresso ao trabalho não se efectua antes do quinto dia após o dia do acidente*” (IGT, (2005)).

A **escala de probabilidade de ocorrência** estabelece seis níveis de classificação, numeradas de 1 a 6, em ordem crescente de probabilidade de ocorrência. Estes níveis apresentam-se qualificados na Tabela I-3.

Tabela I-3 - Escala de probabilidade de ocorrência (Adaptado de Lluna (1997); Roxo, (2003:195 a 200) e Rodrigues F., (2008))

Escala de probabilidade de ocorrência (O)		
Muito improvável	Falha virtualmente impossível de ocorrer (1 num milhão)	1
Improvável	Falha muito pouco provável de ocorrer	2
Pouco provável	Falha pouco provável (ocasional) de acontecer mas é possível que ocorra	3
Provável	Falha perfeitamente possível que ocorra	4
Muito provável	Falha muito provável (quase certo) que ocorra	5
Certo	Falha que é certo que ocorra	6

➤ **Análise da Escala de índice de risco**

Analisando a Tabela I-1 verifica-se que na zona de risco elevado figuram quatro valores de índice de risco aos quais correspondem como consequência dos danos 1 morte (51, 52, 53), ou mesmo várias mortes (61). Apesar da elevadíssima gravidade das consequências nestes níveis de risco, a probabilidade da ocorrência da falha subjacente, varia desde muito improvável a pouco provável. Porém, o facto do dano poder ser a morte ou várias mortes, leva a considerar-se que estes níveis de risco se deveriam classificar na zona de risco muito elevado (Tabela I-4) ou numa zona de risco intermédio, entre a de risco elevado e muito elevado (zona cor de laranja na Tabela I-5). Neste caso levaria a uma redefinição dos níveis de risco como apresentado na Tabela I-5. Apesar desta consideração optou-se por se manter o zonamento indicado na bibliografia consultada (Lluna, 1997: 216 e Roxo, 2003:200) (Tabela I-1), para a avaliação de riscos de cada uma das operações em estudo.

⁶ “*Estatísticas Europeias de Acidentes de Trabalho (EEAT), Metodologia*”, EUROSTAT, 2001.

Tabela I-4 - Escala de índice de risco modificada 1 (Adaptado de Lluna (1997: 216) e de Roxo, (2003:200))

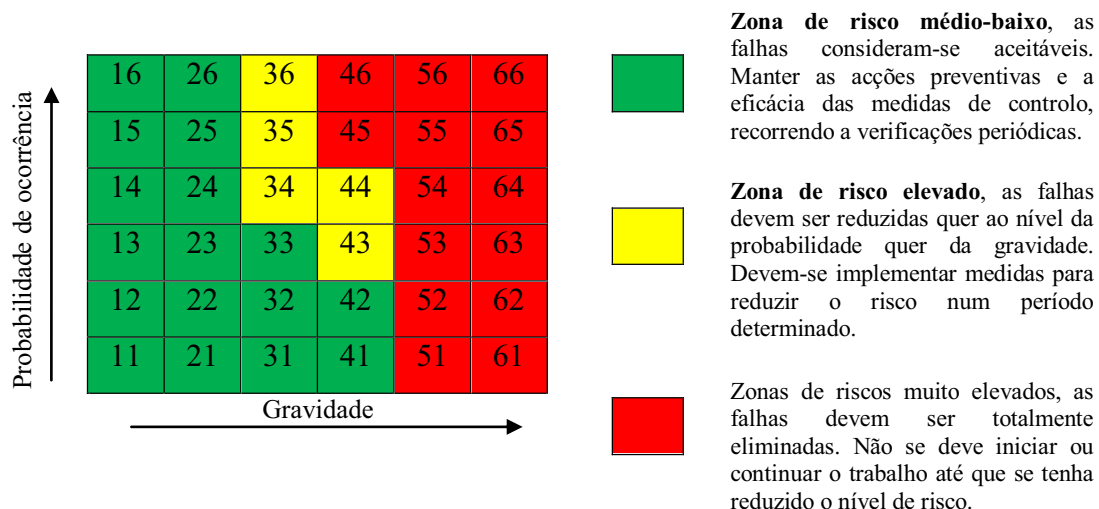
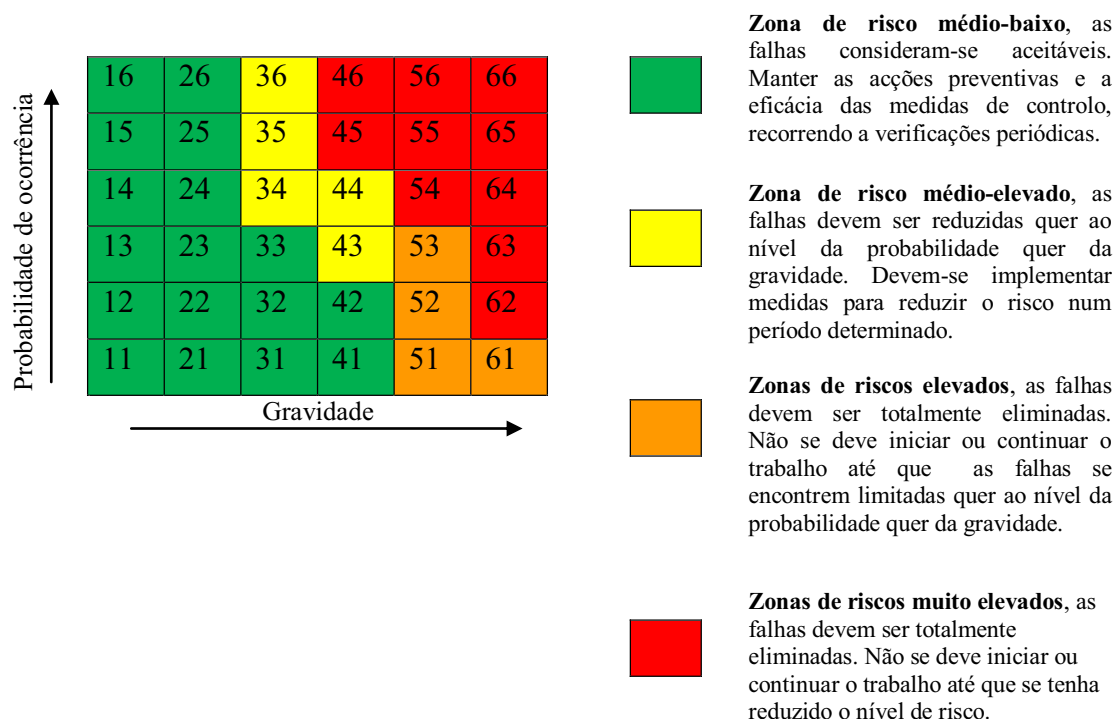


Tabela I-5 - Escala de índice de risco modificada 2 (Adaptado de Lluna (1997: 216) e de Roxo, (2003:200))



Desta forma pede-se que se pronuncie sobre aplicabilidade e a eficácia de cada uma destas escalas:

- gravidade (Tabela I-2);
- probabilidade de ocorrência (Tabela I-3);
- índices de riscos (Tabela I-1, Tabela I-4 e Tabela I-5)

2) Com base nas escalas da Tabela I-1, Tabela I-2 e Tabela I-3, aplique a metodologia de avaliação de riscos efectuada a cada uma das operações de estabilização e reforço de túneis, em análise.

Os métodos de estabilização de maciços em túneis escolhidos são:


- reforço e estabilização com recurso a **betão projectado com fibras metálicas**;
- reforço e estabilização com recurso a **cambotas metálicas**;
- reforço e estabilização com recurso a **pregagens tipo Swellex**;
- reforço e estabilização com recurso a **pregagens activas (com injeção de calda)**;

Como já foi referido recorreu-se ao método de análise de falhas – FMECA. Para sua aplicação, foram construídas tabelas com a seguinte configuração básica:

Ações preventivas recomendadas	Indica as medidas que devem ser tomadas de modo a eliminar ou minimizar os riscos.
IR	Define-se através da associação de dois dígitos (gravidade e probabilidade de ocorrência), podendo variar num espectro de 11 (correspondente ao risco mínimo) a 66 (correspondente ao risco máximo), permitindo adoptar determinadas medidas para minimizar ou eliminar os riscos.
O	Indica a probabilidade de ocorrência do risco em análise, avaliada numa escala de 1 a 6.
G	Indica a gravidade do dano causado no trabalhador, pela exposição ao risco, avaliada numa escala de 1 a 6.
Efeitos / consequências	Indica quais as possíveis consequências ou efeitos causados por exposição aos riscos em análise.
Riscos	Indica quais os riscos associados às falhas ou perigos em análise.
Tipo de efeito	Indica se o efeito é directo ou indirecto, isto é, se for directo significa que os efeitos causados manifestam-se no instante em que ocorrem. Caso contrário se os efeitos apenas se manifestam a longo prazo então estamos perante um efeito indirecto.
Causa(s)	Indica as possíveis causas de ocorrência da falha em análise.
Modo de falha / Perigo	Indica as falhas que podem ocorrer em cada tarefa.
Tarefas	Indica as tarefas subjacentes à operação em estudo.
Operação	Indica a operação em estudo.

Em seguida são apresentadas as tabelas de FMECA referentes a cada um dos métodos de estabilização, onde lhe é pedido que preencha os espaços referentes às classificações de “**gravidade**”, “**probabilidade de ocorrência**” e “**índice de risco**”, referentes a cada um dos riscos associados ao método.

Tabela I-6 – Aplicação do FMECA ao método de estabilização de maciços em túneis com recurso a betão projectado, reforçado com fibras metálicas.

		Departamento de Engenharia Civil										3/3	
APLICAÇÃO DO FMECA AO MÉTODO DE ESTABILIZAÇÃO DE MACIÇOS EM TÚNEIS COM RECURSO A BETÃO PROJECTADO (REFORÇO COM FIBRAS METÁLICAS)													
Operação		Tarefas	Modo de falha / Perigos	Causa(s)	Tipo de efeito	Riscos	Efeitos/consequências	Gravidade (G)	P. Ocorrência (O)	Índice de Risco (IR)	Ações preventivas recomendadas		
Operação de projecção de betão por meios mecânicos para a estabilização do maciço	Preparação do maciço e do local de trabalho para aplicação de betão projectado	Incorrecta preparação da superfície do maciço para projecção de betão	<ul style="list-style-type: none">Saneamento (escoamento) mal executado.	Efeitos directos	<ul style="list-style-type: none">Queda de Materiais;	<ul style="list-style-type: none">Danos materiais;					<ul style="list-style-type: none">Promover fiscalização e controlo de modo a efectuar-se um correcto e seguro escoamento do maciço;		
					Efeitos indirectos	<ul style="list-style-type: none">Instabilização do maciço;Colapso da estrutura de estabilização.	<ul style="list-style-type: none">Danos pessoais (esmagamento, entalamento, morte).						
		Iluminação insuficiente, deficiente ou incorrectamente orientada no local de trabalho	<ul style="list-style-type: none">Falta de meios de iluminação;Iluminação colocada de forma incorrecta;Mau estado de conservação das luminárias.	Efeitos directos	<ul style="list-style-type: none">Erros de execução;Projecção de betão contra os trabalhadores;Encançamento dos trabalhadores;Riscos eléctricos;Queda ao mesmo nível;Colisão entre equipamentos;Colisão equipamento/trabalhador.	<ul style="list-style-type: none">Danos materiais;Danos pessoais (lesões oculares, eletrização, electrocussão, fracturas, escorções, esmagamento, atropelamento).					<ul style="list-style-type: none">Previsão de iluminação suficiente para a segurança dos trabalhadores e da obra;Direccionar os meios de iluminação para as paredes de túnel de forma a evitar o encandeamento dos trabalhadores;Garantir o bom estado de conservação dos cabos eléctricos e luminárias;Fabrico do betão com as características exigidas;Verificar se o tipo de betão que vai ser projectado está de acordo com as respectivas especificações técnicas;Proceder a ensaio de carotes de betão projectado em laboratório;		
					Efeitos indirectos	<ul style="list-style-type: none">Queda de Materiais;Instabilização do maciço;Colapso da estrutura de estabilização.	<ul style="list-style-type: none">Danos materiais;Danos pessoais (esmagamento, entalamento, soterramento, morte).						
	Alimentação do robot de projecção com betão	Incorrecto abastecimento de betão na máquina de projecção	<ul style="list-style-type: none">Incorrecta aproximação da auto-betoneira para alimentação da máquina de projecção de betão;Incorrecta orientação na manobra de aproximação de marcha-a-trás da auto-betoneira (inexistência de auxiliar de manobra, inexistência de sinalização acústica de marcha-a-trás).	Efeitos directos	<ul style="list-style-type: none">Colisão entre equipamentos;	<ul style="list-style-type: none">Danos materiais;					<ul style="list-style-type: none">Promover formação, informação e sensibilização aos manobreadores que executam esta tarefa;		
					Efeitos indirectos	<ul style="list-style-type: none">Colisão equipamento/trabalhador.	<ul style="list-style-type: none">Danos pessoais (esmagamento, entalamento, soterramento, morte).					<ul style="list-style-type: none">Delimitar um perímetro de segurança aquando da movimentação da auto-betoneira;	
	Aplicação do betão projectado	Equipamento de execução inadequado	<ul style="list-style-type: none">Uso de um equipamento de projecção de betão que não é o mais indicado para o efeito;Espessura de betão menor que a exigida.	Efeitos directos	<ul style="list-style-type: none">Queda de betão projectado;	<ul style="list-style-type: none">Danos materiais;					<ul style="list-style-type: none">Escolha do equipamento de projecção de betão adequado ao trabalho;Promover fiscalização de forma a verificar se os equipamentos usados são os adequados ao desempenho da tarefa;Manutenção periódica dos equipamentos;		
					Efeitos indirectos	<ul style="list-style-type: none">Instabilização do maciço;Colapso da estrutura de estabilização.	<ul style="list-style-type: none">Danos pessoais (esmagamento, entalamento, soterramento, morte).						

Departamento de Engenharia Civil										2/3
APLICAÇÃO DO FMECA AO MÉTODO DE ESTABILIZAÇÃO DE MACIÇOS EM TÚNEIS COM RECURSO A BETÃO PROJECTADO (REFORÇADO COM FIBRAS METÁLICAS)										
Operação	Tarefas	Modo de falha / Perigos	Causa(s)	Tipo de efeito	Riscos	Efeitos/consequências	Gravidade (G)	P. Ocorrência (O)	Índice de Risco (R)	Ações preventivas recomendadas
Operação de projecção de betão por meios mecânicos para estabilização do maciço	Aplicação do betão projectado	Manobrador do equipamento mecânico do betão projectado não qualificado	• Incorrecta orientação da projecção de betão; • Trabalhar com o braço da máquina na vertical; • Malha de fibras metálicas não distribuídas uniformemente, • Espessura de betão menor que a exigida; • Desrespeito das distâncias de segurança do manobrador.	Efeitos directos	• Projecção de betão contra os trabalhadores;	• Danos materiais;				• Promover formação, informação e sensibilização ao manobrador do equipamento mecânico de projecção de betão;
					• Queda de materiais;	• Danos pessoais (lesões oculares, atropelamento, esmagamento, entalamento, soterramento, morte).				• Promover fiscalização de forma a verificar se o manobrador do equipamento de projecção possui qualificação para desempenho da tarefa; • Verificar que o manobrador do robót e trabalhadores se encontram afastados o suficiente de forma a não serem atingidos pela projecção de betão ;
				Efeitos indirectos	• Instabilização do maciço; • Colapso da estrutura de estabilização.	• Rebitamento da mangueira em carga; • Fuga e derrame de betão;	• Danos materiais;			• Garantir o bom estado de conservação e manutenção das mangueiras hidráulicas e pneumáticas mediante a sua inspecção visual;
					• Efeito chicote da mangueira.	• Danos pessoais (lesões oculares, corte, fracturas, morte).				• Verificação das conexões da mangueira de condução do betão;
		Problemas associados à mangueira de condução do betão	• Obstrução da mangueira; • Incorrecta conexão da mangueira.	Efeitos directos	• Queda em altura;	• Danos pessoais (fracturas, escoriações, entalamento).				• Formação, informação e sensibilização ao manobrador do equipamentos sobre o seu modo de funcionamento e perigos associados ao mesmo;
					• Queda de objectos;					• Escolha do equipamento de elevação adequado para trabalhos em altura e para elevação de pessoas; • Inspeção e manutenção periódica do equipamento de elevação;
		Equipamento de elevação dos trabalhadores não adequado para o efeito ou com falta de manutenção	• Mau estado de conservação das escadas manuais metálicas; • Incorrecta fixação ou colocação das escadas manuais metálicas; • Mau estado de manutenção ou inexistência de guarda-corpos na cesta de elevação; • Mau estado de conservação do plataforma horizontal da cesta de elevação; • Equipamento de elevação não adequado para pessoas.	Efeitos directos	• Queda de objectos;	• Danos pessoais (fracturas, escoriações, entalamento).				• Quando da utilização de escadas manuais metálicas, garantir que estas são fixas nas suas extremidades, de forma a evitar oscilações e que se encontram em bom estado de manutenção;
					• Queda ao mesmo nível.					• Garantir que os trabalhadores que se encontram na plataforma suspensa possuem meios de segurança fixo a um ponto independente do equipamento; • Garantir que os acessórios de elevação mantêm a identificação do fabricante e marcação CE;
		Incorrecta estabilização e nivelamento das máquinas (plataforma elevatória tipo "Manitou") aquando da movimentação de cargas	• Rotura dos elementos de sustentação da plataforma suspensa; • Incorrecta fixação/amarração da plataforma ao equipamento de elevação de cargas; • Incorrecta colocação das sapatas niveladoras da máquina aquando da movimentação de cargas; • Movimentações bruscas do equipamento em carga; • Excesso de carga; • Equipamento de elevação colocado em zona de maciço instável ou muito desnivelado;	Efeitos directos	• Capotamento da máquina;	• Danos materiais;				• Verificar visualmente a resistência oferecida pelo maciço e correcta estabilização e nivelamento dos equipamentos durante o desempenho das suas funções, de forma a evitar oscilações desnecessárias;
					• Projecção do manobrador e ocupantes.	• Danos pessoais (esmagamento, entalamento, fracturas, escoriações, morte).				• Garantir a correcta amarração da plataforma suspensa ao equipamento de elevação de cargas;
										• Quando o equipamento se encontrar em carga, evitar movimentações bruscas da cesta;
										• Proibida a permanência de trabalhadores nas zonas inferiores da plataforma suspensa;
										• Não exceder a capacidade de carga máxima do equipamento de elevação bem como o número máximo de pessoas na plataforma;

Departamento de Engenharia Civil										3/3
APLICAÇÃO DO FMECA AO MÉTODO DE ESTABILIZAÇÃO DE MACIÇOS EM TÚNEIS COM RECURSO A BETÃO PROJECTADO (REFORÇADO COM FIBRAS METÁLICAS)										
Operação	Tarefas	Modo de falha / Perigos	Causas	Tipo de efeito	Riscos	Efeitos/consequências	Gravidade (G)	P.Ocorrência (O)	Índice de Risco (IR)	Ações preventivas recomendadas
Operação de projecção de betão por meios mecânicos para estabilização do maciço	Aplicação do betão projectado	Falta de aplicação de EPC's adequados à tarefa	<ul style="list-style-type: none"> Falta de sinalização da zona de trabalho; Zonas de circulação de equipamentos mecânicos não definidas ou não sinalizadas. 	Efeitos directos	<ul style="list-style-type: none"> Colisão entre equipamentos; Colisão equipamentos/trabalhadores; Queda ao mesmo nível; Queda em altura. 	<ul style="list-style-type: none"> Danos materiais; Danos pessoais: (atropelamento, enlameamento, fracturas, escorções, morte). 				<ul style="list-style-type: none"> Promover fiscalização e controlo da correcta aplicação dos EPC's necessários; Definir e sinalizar correctamente vias distintas, de circulação de pessoas e equipamentos; Manter os trabalhadores fora do raio de acção dos equipamentos;
			<ul style="list-style-type: none"> Falta de uso de óculos ou viseiras de protecção; Falta de uso de luvas de protecção química e mecânica; Falta de uso de colete reflector, bota de biqueira e palmilha de aço e capacete de protecção; 	Efeitos directos	<ul style="list-style-type: none"> Projecção de betão contra os trabalhadores; Contacto directo do betão com a pele; 	<ul style="list-style-type: none"> Danos pessoais: (Doenças pulmonares ou respiratória, lesões oculares, cortes, lesões a nível cutâneo, perda da capacidade auditiva). 				<ul style="list-style-type: none"> Promover formação, informação e sensibilização aos trabalhadores que executam esta operação; Monitorização da qualidade do ar interior nos túneis e do sistema de ventilação dos mesmos;
		Falta de uso de EPI's adequados à tarefa	<ul style="list-style-type: none"> Falta de uso de máscara de protecção e auriculares. 	Efeitos indirectos	<ul style="list-style-type: none"> Exposição prolongada a empoeiramento e a gases de combustão (equipamentos) ; 					<ul style="list-style-type: none"> Minimizar a libertação de gases por parte dos equipamentos de combustão, recorrendo aplicação de catalisadores; Promover fiscalização e controlo dos trabalhadores para o uso correcto dos EPI's necessários - (fato de protecção, bota de protecção com biqueiras e palmilha de aço, colete, luvas, capacete, viseira, máscara, óculos e protecção auricular).
					<ul style="list-style-type: none"> Exposição prolongada ao ruído provocado pelos equipamentos mecânicos. 					

Tabela I-7 – Aplicação do FMECA ao método de estabilização de maciços em túneis com recurso a cambotas metálicas.

Departamento de Engenharia Civil											1/3	
APLICAÇÃO DO FMECA AO MÉTODO DE ESTABILIZAÇÃO DE MACIÇOS EM TÚNEIS COM RECURSO A CAMBOTAS METÁLICAS												
Operação	Tarefas	Modo de falha / Perigo	Causa(s)	Tipo de efeito	Riscos	Efeitos / consequências	Gravidade (G)	P.Ocorrência (O)	Índice de Risco (IR)	Ações preventivas recomendadas		
Operação de estabilização do maciço recorrendo a cambotas metálicas	Preparação do maciço e do local de trabalho para aplicação das cambotas metálicas	Incorrecta preparação da superfície do maciço para aplicação das cambotas.	• Saneamento (escoamento) mal executado.	Efeitos directos	• Queda de Materiais;	• Danos materiais;				• Promover fiscalização e controlo de modo a efectuar-se um correcto e seguro escoamento do maciço;		
				Efeitos indirectos	• Instabilização do maciço; • Colapso da estrutura de estabilização.	• Danos pessoais (esmagamento, entalamento, morte).						
		Iluminação insuficiente, deficiente ou incorretamente orientada no local de trabalho.	• Falta de meios de iluminação; • Iluminação colocada de forma incorrecta; • Mau estado de conservação das luminárias.	Efeitos directos	• Erros de execução; • Colisão contra objectos; • Encandeamento dos trabalhadores; • Riscos eléctricos; • Queda ao mesmo nível; • Colisão entre equipamentos; • Colisão equipamento/trabalhador.	• Danos materiais; • Danos pessoais: (lesões oculares, electrização, electrocussão, fracturas, escoriações, esmagamento, atropelamento).				• Previsão de iluminação suficiente para a segurança dos trabalhadores e da obra; • Direccionar os meios de iluminação para as paredes de túnel de forma a evitar o encandeamento dos trabalhadores; • Garantir o bom estado de conservação dos cabos eléctricos e luminárias;		
	Carga, transporte e descarga das cambotas metálicas	Incorrecta movimentação mecânica dos materiais.	• Uso de equipamentos de movimentação inadequados para o efeito; • mau estado de conservação dos equipamentos de fixação das cargas (ganchos sem patilhas de segurança, cabos, correntes ou cordas danificadas) e não certificadas; • Incorrecta estabilização e nivelamento das máquinas aquando da movimentação de cargas; • Cargas mal acondicionadas ou mal amarradas.	Efeitos directos	• Queda de Materiais; • Capotamento da máquina.	• Danos materiais (esmagamento, entalamento, atropelamento).	• Danos pessoais			• Escolha de equipamentos adequados para a função de transporte e movimentação das cambotas; • Manutenção regular de todos os equipamentos de fixação das cargas (ganchos com patilhas de segurança e todo o material de elevação, como por exemplo cordas, correntes... devem encontrar-se devidamente fiscalizados e certificados); • Garantir a utilização de cordas guia para manobramento das cargas; • Correcta estabilização e nivelamento das máquinas aquando da movimentação de cargas; • As cargas devem encontrar-se devidamente acondicionadas e correctamente amarradas;		
												• Garantir que durante a carga e descarga não se encontram trabalhadores no raio de acção dos equipamentos nem das cargas suspensas;
												• Delimitar e sinalizar correctamente a zona de passagem de todos os equipamentos e as zonas de movimentação de cargas, usando fitas sinalizadoras ou barreiras de sinalização;
		Zona de passagem dos equipamentos com as cambotas, não delimitada.	• Falta de sinalização das zonas de passagem dos equipamentos.	Efeitos directos	• Colisão entre equipamentos; • Colisão equipamento/trabalhador.	• Danos materiais; • Danos pessoais: (esmagamento, atropelamento, entalamento).				• Promover corredores de circulação de pessoas, delimitando e sinalizando correctamente essas passagens;		

Departamento de Engenharia Civil			2/3											
APLICAÇÃO DO FMECA AO MÉTODO DE ESTABILIZAÇÃO DE MACIÇOS EM TÚNEIS COM RECURSO A CÂMBOTAS METÁLICAS														
Operação	Tarefas	Modo de falha / Perigo	Causa(s)	Tipo de efeito	Riscos	Efeitos / consequências	Gravidade (G)	P. Ocorrência (O)	Índice de Risco (IR)	Ações preventivas recomendadas				
Operação de estabilização do maciço recorrendo a câmbotas metálicas	Aplicação das câmbotas metálicas	Incorrecta execução e sinalização das sapatas das câmbotas metálicas.	<ul style="list-style-type: none">Erros na concepção das sapatas (dimensões);Não sinalização da vala da sapata;Permanência de trabalhadores no raio de acção da máquina.	Efeitos directos	<ul style="list-style-type: none">Queda ao mesmo nível;	<ul style="list-style-type: none">Danos materiais;				<ul style="list-style-type: none">Manter os trabalhadores fora do raio de acção dos equipamentos;Garantir que após abertura da vala, a mesma se encontre devidamente sinalizada;Verificar se as dimensões das sapatas estão de acordo com as respectivas especificações técnicas;				
				Efeitos indirectos	<ul style="list-style-type: none">Instabilização do maciço;Colapso da estrutura de estabilização.	<ul style="list-style-type: none">Danos pessoais: (fracturas, escoriações, esmagamento, soterramento, morte).								
	Montagem incorrecta das câmbotas metálicas.			<ul style="list-style-type: none">Utilização de sistemas de fixação inadequados ao tipo de câmbota metálica a aplicar ;	Efeitos directos	<ul style="list-style-type: none">Queda de Materiais;Riscos eléctricos;Incêndio;Queda em altura;Projeção de partículas;	<ul style="list-style-type: none">Danos materiais;				<ul style="list-style-type: none">Fornecer à frente de trabalho um plano de montagem e fixação de câmbotas metálicas, com as especificações de todos os equipamentos a aplicar;			
														<ul style="list-style-type: none">Promover formação, informação e sensibilização sobre a forma de montagem e fixação das câmbotas metálicas;
														<ul style="list-style-type: none">Escolha de trabalhadores especializados para a realização da tarefa;Garantir a correcta união entre perfis e a sua fixação com grampos metálicos;
														<ul style="list-style-type: none">Garantir o correcto travamento e fixação das câmbotas metálicas às pregagens existentes ou a minigrampos;
	Montagem incorrecta das câmbotas metálicas.			<ul style="list-style-type: none">Número insuficiente de elementos de ligação e de travamento das câmbotas metálicas ;Deficiente soldadura entre as câmbotas e os elementos de fixação.	Efeitos indirectos	<ul style="list-style-type: none">Colapso da estrutura de estabilização.	<ul style="list-style-type: none">Danos pessoais: (corte, electrização, fracturas, escoriações, queimaduras, entalamento, esmagamento, soterramento, morte).				<ul style="list-style-type: none">Garantir o travamento entre câmbotas através de varões de aço soldados de forma a evitar deslocações entre si;Verificar o estado de conservação do aparelho de soldar;Não colocar materiais inflamáveis ou explosivos perto dos locais onde se executam a soldaduras e corte de ferro;			
														<ul style="list-style-type: none">As estruturas geológicas (falhas, fíbeas, diáclases relevantes), assim como as ressurgências de água que forem assinaladas nas fichas de cartografia geológica e nas plantas deverão ser objecto de levantamento topográfico de promenor;
														<ul style="list-style-type: none">Projecto das câmbotas de acordo com as dimensões da abóbada;Presença de topógrafos para análise das condições do terreno e fiscalização da correcta aplicação das câmbotas metálicas;Utilização de equipamentos adequados para a correcta fixação dos elementos das câmbotas metálicas;
	Incorrecta aplicação das câmbotas metálicas face às necessidades exigidas para estabilização do maciço.			<ul style="list-style-type: none">Quantidade insuficiente de câmbotas metálicas aplicadas, face às necessidades exigidas para a estabilização.	Efeitos directos	<ul style="list-style-type: none">Queda de materiais;	<ul style="list-style-type: none">Danos materiais;							
					Efeitos indirectos	<ul style="list-style-type: none">Instabilização do maciço;Colapso da estrutura de estabilização.	<ul style="list-style-type: none">Danos pessoais: (fracturas, escoriações, entalamento, esmagamento, soterramento, morte).							

Departamento de Engenharia Civil										3/3		
APLICAÇÃO DO FMECA AO MÉTODO DE ESTABILIZAÇÃO DE MACIÇOS EM TÚNEIS COM RECURSO A CÂMBOTAS METÁLICAS												
Operação	Tarefas	Modo de falha / Perigo	Causa(s)	Tipo de efeito	Riscos	Efeitos / consequências	Gravidade (G)	P. Ocorrência (O)	Índice de Risco (IR)	Ações preventivas recomendadas		
Operação de estabilização do maciço recorrendo a câmbotas metálicas	Aplicação das câmbotas metálicas	Equipamento de elevação dos trabalhadores não adequado para o efeito ou com falta de manutenção.	<ul style="list-style-type: none">Mau estado de conservação das escadas manuais metálicas;Incorrecta fixação ou colocação das escadas manuais metálicas;Mau estado de manutenção ou inexistência de guarda-corpos na cesta de elevação;Mau estado de conservação do equipamento horizontal da cesta de elevação;Equipamento de elevação não adequado para pessoas.	Efeitos directos	<ul style="list-style-type: none">Queda em altura;Queda de objectos;Queda ao mesmo nível.	<ul style="list-style-type: none">Danos pessoais: (fracturas, escoriações, entalamento).				<ul style="list-style-type: none">Escolha do equipamento de elevação adequado para trabalhos em altura e para elevação de pessoas;Inspeção e manutenção periódica do equipamento de elevação;Aquando da utilização de escadas manuais metálicas, garantir que estas são fixas nas suas extremidades, de forma a evitar oscilações e que se encontram em bom estado de manutenção;Garantir que os trabalhadores que se encontram na plataforma suspensa possuem um âncora de segurança fixo a um ponto independente do equipamento;Garantir que os acessórios de elevação mantêm a identificação do fabricante e marcação CE;Garantir a correcta amarração da plataforma suspensa do equipamento de elevação de cargas e pessoas;		
			<ul style="list-style-type: none">Rotura dos elementos de sustentação da plataforma suspensa;Incorrecta fixação/amarração da plataforma ao equipamento de elevação de cargas;Incorrecta colocação das sapatas niveladoras da máquina aquando da movimentação de cargas;Movimentações bruscas do equipamento em carga;Excesso de carga;Equipamento de elevação colocado em zona de maciço instável ou muito desnivelado.	Efeitos directos	<ul style="list-style-type: none">Capotamento da máquina;Projeção do manobrador e ocupantes.	<ul style="list-style-type: none">Danos materiais;Danos pessoais (esmagamento, entalamento, fracturas, escoriações, morte).			<ul style="list-style-type: none">Verificar visualmente a resistência oferecida pelo maciço e correcta estabilização e nivelamento dos equipamentos durante o desempenho das suas funções, de forma a evitar oscilações desnecessárias;Garantir a correcta amarração da plataforma suspensa ao equipamento de elevação de cargas;Quando o equipamento se encontrar em carga, evitar movimentações bruscas da cesta;Proibir a permanência de trabalhadores nas zonas inferiores da plataforma suspensa;Não exceder a capacidade de carga máxima do equipamento de elevação bem como o número máximo de pessoas na plataforma;			
			<ul style="list-style-type: none">Falta de sinalização da zona de trabalho;Zonas de circulação de equipamentos mecânicos não definidas ou não sinalizadas.	Efeitos directos	<ul style="list-style-type: none">Colisão entre equipamentos;Colisão equipamentos/trabalhadores;Queda ao mesmo nível;Queda em altura.	<ul style="list-style-type: none">Danos materiais;Danos pessoais: (atropelamento, entalamento, fracturas, escoriações, morte).			<ul style="list-style-type: none">Promover fiscalização e controlo da correcta aplicação dos EPC's necessários;Definir e sinalizar correctamente vias distintas de circulação de pessoas e equipamentos;Mantiver os trabalhadores fora do raio de acção dos equipamentos;			
		<ul style="list-style-type: none">Falta de uso de óculos ou viseiras de protecção;Falta de uso de luvas de protecção mecânica;Falta de uso de colete reflector, botes de biqueira e palmilha de apoio e capacete de protecção;	Efeitos directos	<ul style="list-style-type: none">Projeção de partículas contra os trabalhadores;	<ul style="list-style-type: none">Danos pessoais: (Doenças pulmonares ou respiratória, lesões oculares, lesões a nível cutânea, queimaduras, perda da capacidade auditiva).			<ul style="list-style-type: none">Promover formação, informação e sensibilização aos trabalhadores que executam esta operação;Monitorização da qualidade do ar interior nos túneis e do sistema de ventilação dos mesmos;				
		<ul style="list-style-type: none">Falta de uso de EPI's adequados à tarefa.	Efeitos indirectos	<ul style="list-style-type: none">Exposição prolongada a empoeiramento e a gases de combustão (equipamentos);Exposição prolongada ao ruído provocado pelos equipamentos mecânicos.			<ul style="list-style-type: none">Minimizar a libertação de gases por parte dos equipamentos de combustão, recorrendo aplicação de catalisadores;Promover fiscalização e controlo dos trabalhadores para o uso correcto dos EPI's necessários - (bota de protecção com biqueiras e palmilha de aço, colete, luvas, capacete, viseira, máscara, óculos e protecção auricular).					

Tabela I-8 – Aplicação do FMECA ao método de estabilização de maciços em túneis com recurso a pregagens tipo *Swellex*.

Departamento de Engenharia Civil											1/4
APLICAÇÃO DO FMECA AO MÉTODO DE ESTABILIZAÇÃO DE MACIÇOS EM TÚNEIS COM RECURSO A PREGAGENS TIPO SWELEX											
Operação	Tarefas	Modo de falha / Perigo	Causa(s)	Tipo de efeito	Riscos	Efeitos / consequências	Gravidade (G)	P.Ocorrência (O)	Índice de Risco (R)	Ações preventivas recomendadas	
Operação de estabilização de maciços recorrendo a pregagens tipo Swellex	Preparação do maciço e do local de trabalho para aplicação das pregagens tipo Swellex	Incorrecta preparação da superfície do maciço para colocação das pregagens;	• Saneamento (escoamento) mal executado.	Efeitos directos	• Queda de Materiais;	• Danos materiais;				• Promover fiscalização e controlo de modo a efectuar-se um correcto e seguro escoamento do maciço;	
				Efeitos indirectos	• Instabilização do maciço. • Colapso da estrutura de estabilização.	• Danos pessoais (esmagamento, entalamento, morte).					
		Iluminação insuficiente, deficiente ou incorrectamente orientada no local de trabalho.	• Falta de meios de iluminação;		• Erros de execução;	• Danos materiais;					• Previsão de iluminação suficiente para a segurança dos trabalhadores e da obra;
				Efeitos directos	• Encandeamento dos trabalhadores; • Riscos eléctricos; • Queda ao mesmo nível; • Colisão entre equipamentos; • Colisão equipamento/trabalhador.	• Danos pessoais: (lesões oculares, electrocussão, fracturas, escoriações, esmagamento, atropelamento).				• Direcção dos meios de iluminação para as paredes de túnel de forma a evitar o encandeamento dos trabalhadores;	
	Aplicação das pregagens tipo Swellex	Equipamento de execução inadequado;	• Mau estado de conservação das luminárias.		• Queda de Materiais;	• Danos materiais;					• Garantir o bom estado de conservação dos cabos eléctricos e luminárias;
				Efeitos directos	• Projectão de partículas;	• Danos pessoais: (fracturas, escoriações, esmagamento, perfuração, doenças respiratórias, soterramento, morte)				• Utilização de equipamentos adequados para uma correcta aplicação das pregagens; • O equipamento de furação deve conter acessórios de recolha de poeiras ou furação por via húmida, de forma a reduzir o empoeiramento;	
		Distâncias de segurança não verificadas;	• Não delimitação da zona de segurança junto aos equipamentos.	Incorrecta adaptação da Swellex ao maciço.	Efeitos indirectos	• Instabilização do maciço; • Colapso da estrutura de estabilização.	• Danos materiais;				• Manutenção e inspeção periódica de todos os equipamentos utilizados para a realização da tarefa;
					Efeitos directos	• Queda de Materiais; • Colisão equipamento/trabalhador; • Projectão de partículas.	• Danos pessoais: (atropelamento, esmagamento, entalamento, lesões oculares).				• Previsão de corredores de circulação de pessoas distintas dos equipamentos; • Delimitação de perímetros de segurança relativamente à frente de perfuração e à colocação do equipamento;

Departamento de Engenharia Civil										2/4
APLICAÇÃO DO FMECA AO MÉTODO DE ESTABILIZAÇÃO DE MACIÇOS EM TÚNEIS COM RECURSO A PREGAGENS TIPO SWLLEX										
Operação	Tarefas	Modo de falha / Perigo	Causa(s)	Tipo de efeito	Riscos	Efeitos / consequências	Gravidade (G)	P. Ocorrência (O)	Índice de Risco (It)	Ações preventivas recomendadas
Operação de estabilização de maciços recorrendo a pregagens tipo Swllex	Aplicação das pregagens tipo Swllex	Incorrecta estabilização e nivelamento das máquinas (plataforma elevatória tipo "Mantou") aquando da movimentação de cargas;	<ul style="list-style-type: none">• Ruptura dos elementos de sustentação da plataforma suspensa;• Incorrecta fixação/ amarração da plataforma ao equipamento de elevação de cargas;• Incorrecta colocação das sapatas niveladoras da máquina aquando da movimentação de cargas;• Movimentações bruscas do equipamento em carga;	Efeitos directos	<ul style="list-style-type: none">• Capotamento da máquina;	<ul style="list-style-type: none">• Danos materiais;				<ul style="list-style-type: none">• Verificar visualmente a resistência oferecida pelo maciço e correcta estabilização e nivelamento dos equipamentos durante o desempenho das suas funções, de forma a evitar oscilações desnecessárias;• Garantir a correcta amarração da plataforma suspensa ao equipamento de elevação de cargas;• Quando o equipamento se encontrar em carga, evitar movimentações bruscas da cesta;• Proibida a permanência de trabalhadores nas zonas inferiores da plataforma suspensa;• Não exceder a capacidade de carga máxima do equipamento de elevação bem como o número máximo de pessoas na plataforma;
			<ul style="list-style-type: none">• Excesso de carga;• Equipamento de elevação colocado em zona de maciço instável ou muito desvelado.		<ul style="list-style-type: none">• Projecção do manobrador e ocupantes.	<ul style="list-style-type: none">• Danos pessoais (ermagamento, entalamento, fracturas, escoriações, morte).				
		Equipamento de elevação dos trabalhadores não adequado para o efeito ou com falta de manutenção;	<ul style="list-style-type: none">• Mau estado de conservação das escadas manuais metálicas;• Incorrecta fixação ou colocação das escadas manuais metálicas;• Mau estado de manutenção ou inexistência de guarda-corpos na cesta de elevação;• Mau estado de conservação do plataforma horizontal da cesta de elevação;• Equipamento de elevação não adequado para pessoas.	Efeitos directos	<ul style="list-style-type: none">• Queda em altura;• Queda de objectos;• Queda ao mesmo nível.	<ul style="list-style-type: none">• Danos pessoais: (fracturas, escoriações, entalamento).				<ul style="list-style-type: none">• Escolha do equipamento de elevação adequado para trabalhos em altura e para elevação de pessoas;• Inspeção e manutenção periódica do equipamento de elevação;• Aquando da utilização de escadas manuais metálicas, garantir que estas são fixas nas suas extremidades, de forma a evitar oscilações e que se encontram em bom estado de manutenção;• Garantir que os trabalhadores que se encontram na plataforma suspensa possuem meios de segurança fixos um ponto independente do equipamento;• Garantir que os acessórios de elevação mantêm a identificação do fabricante e marcação CE;• Garantir a correcta amarração da plataforma suspensa do equipamento de elevação de cargas e pessoas;• Garantir o bom estado de conservação e manutenção das mangueiras hidráulicas e pneumáticas mediante a sua inspecção visual;• Verificação das conexões da mangueira de condução de água;• Formação, informação e sensibilização dos manobreadores dos equipamentos sobre o seu modo de funcionamento e perigos associados aos mesmos;
			<ul style="list-style-type: none">• Obstrução da mangueira;• Incorrecta conexão da mangueira.	Efeitos directos	<ul style="list-style-type: none">• Rebentamento da mangueira em carga;• Fuga de água sob pressão;• Efeito chicote da mangueira.	<ul style="list-style-type: none">• Danos materiais;• Danos pessoais (lesões oculares, corte, fracturas, morte).				

Universidade de Aveiro		Departamento de Engenharia Civil										3/4	
APLICAÇÃO DO FMECA AO MÉTODO DE ESTABILIZAÇÃO DE MACIÇOS EM TÚNEIS COM RECURSO A PREGAGENS TIPO SWELLEX													
Operação de estabilização de maciços recorrendo a pregagens tipo Swellex	Tarefas	Modo de falha / Perigo	Causa(s)	Tipo de efeito	Riscos	Efeitos / consequências	Gravidade (G)	P.Ocorrência (O)	Índice de Risco (IR)	Ações preventivas recomendadas			
Operação de estabilização de maciços recorrendo a pregagens tipo Swellex	Aplicação das pregagens tipo Swellex	Erros na execução das pregagens;	• Incorrecta orientação das pregagens nas diálises;	Efeitos directos	• Queda de Materiais;	• Danos materiais;				• Colocação das pregagens sempre na perpendicular às diálises e nunca no sentido da diálise nem dentro da mesma;			
			• Incorrectas dimensões do furo para colocação da pregagem (incorrecta adaptação da Swellex ao maciço);						• Verificar se a pressão de água aplicada na Swellex é a necessária;				
			• Insuficiente pressão de água aplicada na Swellex.	Efeitos indirectos	• Instabilização do maciço; • Colapso da estrutura de estabilização.	• Danos pessoais: (fracturas, escorriações, entalamento, soterramento, morte).				• Promover formação, informação e sensibilização sobre a forma de execução das pregagens tipo Swellex;			
										• Escolha de trabalhadores especializados para a realização da tarefa;	• Supervisão e fiscalização aquando da realização da tarefa;		
	Aplicação das pregagens tipo Swellex	Incorrecta aplicação das pregagens face às necessidades exigidas para estabilização do maciço;	• Aplicação de pregagens com dimensões incorrectas face às necessidades exigidas para a estabilização (diâmetro e comprimento do varão);	Efeitos directos	• Queda de Materiais;	• Danos materiais;				• Verificação das dimensões e da quantidade de pregagens necessárias para uma correcta e segura estabilização do maciço;	• As estruturas geológicas (falhas, fílees, diálises relevantes), assim como as ressurgências de água que forem assinaladas nas fichas de cartografia geológica e nas plantas deverão ser objecto de levantamento topográfico de promenor;		
											• Promover formação, informação e sensibilização sobre a forma de execução das pregagens tipo Swellex;	• Escolha de trabalhadores especializados para a realização da tarefa;	
			• Quantidade insuficiente de pregagens aplicadas face às necessidades exigidas para a estabilização (malha mal definida ou insuficiente) ;	Efeitos indirectos	• Colapso da estrutura de estabilização.	• Danos pessoais: (fracturas, escorriações, entalamento, soterramento, morte).				• Supervisão e fiscalização por parte de um geólogo aquando da realização da tarefa;	• Promover fiscalização e controlo da correcta aplicação dos EPC's necessários;		
											• Definir e sinalizar correctamente vias distintas, de circulação de pessoas e equipamentos;	• Manter os trabalhadores fora do raio de acção dos equipamentos;	
Falta de aplicação de EPC's adequados à tarefa;		• Falta de sinalização da zona de trabalho;	Efeitos directos	• Colisão entre equipamentos; • Colisão equipamentos/trabalhadores; • Queda ao mesmo nível; • Queda em altura.	• Danos materiais;								
					• Danos pessoais: (atropelamento, entalamento, fracturas, escorriações, morte).								

Universidade de Aveiro		Departamento de Engenharia Civil					4/4			
APLICAÇÃO DO FMECA AO MÉTODO DE ESTABILIZAÇÃO DE MACIÇOS EM TÚNEIS COM RECURSO A PREGAGENS TIPO SWELLEX										
Operação	Tarefas	Modo de falha / Perigo	Causa(s)	Tipo de efeito	Riscos	Efeitos / consequências	Gravidade (G)	P.Ocorrência (O)	Índice de Risco (IR)	Ações preventivas recomendadas
Operação de estabilização de maciços recorrendo a pregagens tipo Swellex	Aplicação das pregagens tipo Swellex	Falta de uso de EPI's adequados à tarefa.	<ul style="list-style-type: none">Falta de uso de óculos ou viseiras de protecção;Falta de uso de luvas de protecção mecânica;Falta de uso de colete reflector, botas de biqueira e palmilha de aço e capacete de protecção;	Efeitos directos	<ul style="list-style-type: none">Projectção de água contra os trabalhadores;	<ul style="list-style-type: none">Danos pessoais: (Doenças pulmonares ou respiratória, lesões oculares, cortes, perda da capacidade auditiva).				<ul style="list-style-type: none">Promover formação, informação e sensibilização aos trabalhadores que executam esta tarefa;Monitorização da qualidade do ar interior nos túneis e do sistema de ventilação dos mesmos;Minimizar a libertação de gases por parte dos equipamentos de combustão, recorrendo aplicação de catalisadores;Promover fiscalização e controlo dos trabalhadores para o uso correcto dos EPI's necessários - (fato de protecção, botas de protecção com biqueiras e palmilha de aço, colete, luvas, capacete, viseira, máscara, óculos e protecção auricular);Verificar que os trabalhadores afectos à furação utilizam roupa justa ao corpo, para que esta não se prenda no equipamento de furação.
			<ul style="list-style-type: none">Falta de uso de máscara de protecção e auriculares.	Efeitos indirectos	<ul style="list-style-type: none">Exposição prolongada ao ruído provocado pelos equipamentos mecânicos.					

Tabela I-9 – Aplicação do FMECA ao método de estabilização de maciços em túneis com recurso a pregagens activas com injeção de calda.

Departamento de Engenharia Civil											1/4
APLICAÇÃO DO FMECA AO MÉTODO DE ESTABILIZAÇÃO DE MACIÇOS EM TÚNEIS COM RECURSO A PREGAGENS ACTIVAS COM INJEÇÃO DE CALDA											
Operação	Tarefas	Modo de falha / perigo	Causa(s)	Tipo de efeito	Riscos	Efeitos / consequências	Gravidade (G)	P.Ocorrência (O)	Índice de Risco (IR)	Ações preventivas recomendadas	
Operação de estabilização de maciços em túneis, recorrendo a pregagens activas com injeção de calda	Preparação do maciço e do local de trabalho para aplicação das pregagens	Incorrecta preparação da superfície do maciço para colocação das pregagens;	• Saneamento (escombramento) mal executado.	Efeitos directos	• Queda de Materiais;	• Danos materiais;				• Promover fiscalização e controlo de modo a efectuar-se um correcto e seguro escombramento do maciço;	
				Efeitos indirectos	• Instabilização do maciço; • Colapso da estrutura de estabilização.	• Danos pessoais (esmagamento, entalamento, morte).					
		Iluminação insuficiente, deficiente ou incorrectamente orientada no local de trabalho.	• Falta de meios de iluminação; • Iluminação colocada de forma incorrecta; • Mau estado de conservação das luminárias.	Efeitos directos	• Erros de execução; • Projecção de betão contra os trabalhadores; • Encandamento dos trabalhadores; • Riscos eléctricos; • Queda ao mesmo nível; • Colisão entre equipamento; • Colisão equipamento/trabalhador.	• Danos materiais;				• Previsão de iluminação suficiente para a segurança dos trabalhadores e da obra;	
						• Danos pessoais: (lesões oculares, electrização, electrocussão, fracturas, escoriações, esmagamento, atropelamento).				• Direcionar os meios de iluminação para as paredes de túnel de forma a evitar o encandamento dos trabalhadores;	
										• Garantir o bom estado de conservação dos cabos eléctricos e luminárias ;	
	Preparação da calda de betão	Características Inadequadas da calda de betão.	• Incorrecto doseamento da calda de betão (Incorrecta adaptação da pregagem ao maciço).	Efeitos directos	• Queda de Materiais;	• Danos materiais;				• Fabrico da calda de betão com as características exigidas;	
				Efeitos indirectos	• Instabilização do maciço; • Colapso da estrutura de estabilização.	• Danos pessoais: (fracturas, escoriações, esmagamento, soterramento, morte).				• Verificar se a calda de betão que se vai Injectar está conforme as respectivas especificações técnicas;	
	Aplicação das pregagens	Equipamento de execução inadequado; • Mau estado dos equipamentos para execução das pregagens (equipamento de função e equipamento de injeção de calda); • Incorrecta adaptação da pregagem ao maciço.	Efeitos directos	• Queda de Materiais; • Projecção de partículas;	• Danos materiais;					• Utilização de equipamentos adequados para uma correcta aplicação das pregagens;	
				• Empoeiramento;	• Danos pessoais: (fracturas, escoriações, esmagamento, perfuração, doenças respiratórias, soterramento, morte).				• O equipamento de furação deve conter acessórios de recolha de poeiras ou furação por via húmida, de forma a reduzir o empoeiramento;		
			Efeitos indirectos	• Instabilização do maciço; • Colapso da estrutura de estabilização.	• Danos pessoais: (fracturas, escoriações, esmagamento, perfuração, doenças respiratórias, soterramento, morte).				• Manutenção e inspecção periódica de todos os equipamentos implícitos na tarefa;		
									• Interdição de permanência de pessoas dentro da zona de perigo;		
		Distâncias de segurança não verificadas;	• Não delimitação da zona de segurança junto aos equipamentos.	Efeitos directos	• Queda de Materiais;	• Danos materiais;				• Previsão de corredores de circulação de pessoas distintos dos equipamentos;	
					• Colisão equipamento/trabalhador; • Projecção de partículas.	• Danos pessoais: (atropelamento, esmagamento, entalamento, lesões oculares).				• Delimitação de perímetros de segurança relativamente à frente de perfuração e à colocação do equipamento;	

Departamento de Engenharia Civil										2/4
APLICAÇÃO DO FMECA AO MÉTODO DE ESTABILIZAÇÃO DE MACIÇOS EM TÚNEIS COM RECURSO A PREGAGENS ACTIVAS COM INJEÇÃO DE CALDA										
Operação	Tarefas	Modo de falha / perigo	Causas	Tipo de efeito	Riscos	Efeitos / consequências	Gravidade (G)	P. Ocorrência (O)	Índice de Risco (IR)	Acções preventivas recomendadas
Operação de estabilização de maciços em túneis, recorrendo a pregagens activas com injeção de calda	Aplicação das pregagens	Incorrecta estabilização e nivelamento das máquinas (plataforma elevatória tipo "Manitou") aquando da movimentação de cargas;	<ul style="list-style-type: none">Ruptura dos elementos de sustentação da plataforma suspensa;Incorrecta fixação/amarração da plataforma ao equipamento de elevação de cargas;	Efeitos directos	<ul style="list-style-type: none">Capotamento da máquina;	<ul style="list-style-type: none">Danos materiais;				<ul style="list-style-type: none">Verificar visualmente a resistência oferecida pelo maciço e correcta estabilização e nivelamento dos equipamentos durante o desempenho das suas funções, de forma a evitar oscilações desnecessárias;Garantir a correcta amarração da plataforma suspensa ao equipamento de elevação de cargas;Quando o equipamento se encontrar em carga, evitar movimentações bruscas da cesta;Proibir a permanência de trabalhadores nas zonas inferiores da plataforma suspensa;Não exceder a capacidade de carga máxima do equipamento de elevação bem como o número máximo de pessoas na plataforma;Escolha do equipamento de elevação adequado para trabalhos em altura e para elevação de pessoas;Inspeção e manutenção periódica do equipamento de elevação;Aquando da utilização de escadas manuais metálicas, garantir que estas são fixas nas suas extremidades, de forma a evitar oscilações e que se encontram em bom estado de manutenção;Garantir que os trabalhadores que se encontram na plataforma suspensa possuem arneses de segurança fixos a um ponto independente do equipamento;Garantir que os acessórios de elevação mantêm a identificação do fabricante e marcação CE;Garantir a correcta amarração da plataforma suspensa do equipamento de elevação de cargas e pessoas;
			<ul style="list-style-type: none">Incorrecta colocação das sapatas niveladoras da máquina aquando da movimentação de cargas;Movimentações bruscas do equipamento em carga;Excesso de carga;Equipamento de elevação colocado em zona de maciço instável ou muito desnivelado.		<ul style="list-style-type: none">Projeção do manobrador e ocupantes.	<ul style="list-style-type: none">Danos pessoais (esmagamento, entalamento, fracturas, escoriações, morte).				
		Equipamento de elevação dos trabalhadores não adequado para o efeito ou com falta de manutenção;	Efeitos directos	<ul style="list-style-type: none">Queda em altura;Queda de objectos;Queda ao mesmo nível.	<ul style="list-style-type: none">Danos pessoais: (fracturas, escoriações, entalamento).					
		Problemas associados à mangueira de condução do betão;	<ul style="list-style-type: none">Obstrução da mangueira;Incorrecta conexão da mangueira.	Efeitos directos	<ul style="list-style-type: none">Rebentamento da mangueira em carga;Fuga e derrame de betão;Efeito chicote da mangueira.	<ul style="list-style-type: none">Danos materiais;Danos pessoais (lesões oculares, corte, fracturas, morte).				<ul style="list-style-type: none">Garantir o bom estado de conservação e manutenção das mangueiras hidráulicas e pneumáticas mediante a sua inspeção visual;Verificação das conexões da mangueira de condução da calda de betão;Formação do manobrador do equipamento sobre o seu modo de funcionamento e perigos associados ao mesmo;

Departamento de Engenharia Civil											3/4										
APLICAÇÃO DO FMECA AO MÉTODO DE ESTABILIZAÇÃO DE MACIÇOS EM TÚNEIS COM RECURSO A PREGAGENS ACTIVAS COM INJEÇÃO DE CALDA																					
Operação	Tarefas	Modo de falha / perigo	Causa(s)	Tipo de efeito	Riscos	Efeitos / consequências	Gravidade (G)	P.Ocorrência (O)	Índice de Risco (IR)	Ações preventivas recomendadas											
Operação de estabilização de maciços em túneis, recorrendo a pregagens activas com injeção de calda	Aplicação das pregagens	Erros na execução das pregagens;	• Incorrecta orientação das pregagens nas diálases;	Efeitos directos	• Queda de materiais;	• Danos materiais;				• Colocação das pregagens sempre na perpendicular às diálases e nunca no sentido da diálase nem dentro da mesma;											
											• Incorrectas dimensões do furo para colocação da pregagem;										
			• Pressão inadequada aplicada na injeção da calda podendo originar vazios, pondo em causa a correcta fixação da pregagem;	Efeitos indirectos	• Instabilização do maciço;	• Danos pessoais: (fracturas, escoriações, esmagamento, entalamento, soterramento, morte).				• Escolha de trabalhadores especializados para a realização da tarefa;											
											• Insuficient tempo de presa da calda para lhe ser aplicado o esforço, introduzido pela aplicação da chapa de aperto no prego.										
			Efeitos directos	• Queda de Materiais;	• Danos materiais;				• As estruturas geológicas (falhas, filões, diálases relevantes), assim como as ressurgências de água que forem assinaladas nas fichas de cartografia geológica e nas plantas deverão ser objecto de levantamento topográfico de promenor;												
										• Aplicação de pregagens com dimensões incorrectas face as necessidades exigidas para a estabilização (diâmetro e comprimento do varão);											
		Incorrecta aplicação das pregagens face as necessidades exigidas para a estabilização do maciço;	Efeitos indirectos	• Colapso da estrutura de estabilização;	• Danos pessoais: (fracturas, escoriações, entalamento, esmagamento, soterramento, morte).				• Verificação das diemensões e da quantidade de pregagens necessárias para uma correcta e segura estabilização do maciço;												
										• Quantidade insuficiente de pregagens aplicadas face as necessidades exigidas para a estabilização (malha mal definida ou insuficiente);											
		Falta de aplicação de EPC's adequados à tarefa;		• Falta de sinalização da zona de trabalho;	• Incorrecta identificação das diálases e falhas (má interpretação geológica).	Efeitos directos	• Colisão entre equipamentos;	• Danos materiais;				• Escolha de trabalhadores especializados para a realização da tarefa;									
													• Zonas de circulação de equipamentos mecânicos não de finida ou não sinalizados.								
					• Colisão equipamentos/trabalhadores;	• Danos pessoais: (atropelamento, fracturas, escoriações, morte).				• Promover fiscalização e controlo da correcta aplicação dos EPC's necessários;											

Departamento de Engenharia Civil					4/4						
APLICAÇÃO DO FMECA AO MÉTODO DE ESTABILIZAÇÃO DE MACIÇOS EM TÚNEIS COM RECURSO A PREGAGENS ACTIVAS COM INIECÇÃO DE CALDA											
Operação	Tarefas	Modo de falha /perigo	Causa(s)	Tipo de efeito	Riscos	Efeitos /consequências	Gravidade (G)	P.Ocorrência (O)	Índice de Risco (IR)	Ações preventivas recomendadas	
Operação de estabilização de maciços em túneis, recorrendo a pregagens activas com injeção de calda	Aplicação das pregagens	Falta de uso de EPI's adequados à tarefa.	Falta de uso de EPI's por parte dos trabalhadores na execução, manipulação e injeção de calda de betão para a pregagem;	Efeitos directos	<ul style="list-style-type: none">Projeção de calda de betão contra os trabalhadores;Contacto directo do betão com a pele.	<ul style="list-style-type: none">Danos pessoais: (Doenças pulmonares ou respiratória, lesões oculares, lesões a nível cutâneo, cortes, perda da capacidade auditiva).				<ul style="list-style-type: none">Promover formação, informação e sensibilização aos trabalhadores que executam esta operação;Monitorização da qualidade do ar interior nos túneis e do sistema de ventilação dos mesmos;Minimizar a libertação de gases por parte dos equipamentos de combustão, recorrendo aplicação de catalisadores;Promover fiscalização e controlo dos trabalhadores para o uso correcto dos EPI's necessários - (fato de protecção, botas de protecção com biqueiras e palmilha de aço, colete, luvas de protecção química e mecânica, capacete, viseira, máscara, óculos e protecção auricular);Verificar que os trabalhadores afectos à furação utilizam roupa justa ao corpo, para que esta não se prenda no equipamento de furação.	
				Efeitos indirectos	<ul style="list-style-type: none">Exposição prolongada a empoeiramento e a gases de combustão (equipamentos) ;Exposição prolongada ao ruído provocado pelos equipamentos mecânicos.						
		Falta de uso de EPI's por parte do manobrador do "jumbo" (equipamento de furação).									